

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky**

**Měření rychlosti v automobilovém provozu pomocí  
optovláknových Braggovských mřížek**

**Speed measurement in car traffic using fiber optic Bragg gratings**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Patrik Binder**

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Měření rychlosti v automobilovém provozu pomocí optovláknových  
Braggovských mřížek  
Speed measurement in car traffic using fiber optic Bragg gratings

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Práce se orientuje na využití optovláknových Braggovských mřížek (FBG) v automobilové dopravě. Cílem práce je návrh a realizace senzoru využívajícího Braggovské mřížky pro detekci a měření rychlosti automobilů. Praktické řešení bude ověřeno experimentálním měřením.

1. Rešerše konvenčních přístupů měření rychlosti v automobilové dopravě
2. Návrh a realizace FBG senzoru implementovaného do vozovky a na vozovku
3. Návrh a implementace zpracování signálů pro potřeby detekce a měření rychlosti automobilu
4. Praktické ověření navrženého senzoru měřením v provozu

Seznam doporučené odborné literatury:


[1] OTHONOS, Andreas, Kyriacos KALLI a Francis T YU. Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing. 2nd ed. Boston, Mass.: Artech House, 1999, xiv, 422 p. Optical science and engineering (Boca Raton, Fla.), 132. ISBN 08-900-6344-3.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marcel Fajkus, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019

  
prof. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry




  
prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
děkan fakulty

## Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som tuto diplomovú prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky literárne  
pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

V Ostrave dňa: *18. apríl 2019*

  
.....  
podpis študenta

## **Pod'akovanie**

Rád by som pod'akoval Ing. Marcelovi Fajkusovi, Ph.D. za odbornú pomoc a konzultáciu pri vytváraní tejto diplomovej práce. Taktiež by som chcel pod'akovať prof. RNDr. Vladimírovi Vašínkovi, CSc. za umožnenie implementácie senzorov do vozovky na ulici Hlubočická v Ostrave.

## **Abstrakt**

Diplomová práca je venovaná téme meraniu v automobilovej doprave pomocou Braggovskej mriežky. Hlavným cieľom je na základe získaných poznatkov z konceptov, ktoré sú popísané v kapitolách tri, štyri, päť a šesť, navrhnúť a vytvoriť senzor. Ďalšie kapitoly práce sa venujú návrhu, realizácii a implementácii optických senzorov do vozovky, pomocou ktorých sa bude vyhodnocovať rýchlosť vozidiel.

V prvej kapitole teoretickej časti sa nachádza opis viacerých druhov optických vlákien a ich parametrami. V druhej kapitole sa nachádza podrobný opis Braggovskej mriežky a jej využitia. Optické senzory sú opísané v tretej kapitole. V dnešnej dobe je niekoľko spôsobov, ktoré sa využívajú pri meraní rýchlosti v automobilovej doprave, tie je možné nájsť v štvrtej kapitole. V kapitolách päť a šesť sa nachádzajú koncepty využívania optických senzoroch v doprave, ktoré výrazne pomohli pri návrhu optického senzora.

V praktickej časti sa nachádza analýza z merania jedného PDMS senzora, z ktorého následne vychádza návrh a implementácia optických senzora na meranie rýchlosti vozidiel.

Po návrhu a implementovaní senzorov do vozovky, sú vyhodnotené výsledky a následne vypočítaná relatívna chyba merania v SW Matlab.

## **Kľúčové slova**

FBG; PDMS senzor; Braggovská mriežka; vlnová dĺžka; optické vlákno; implementácia; rýchlosť; optický senzor; uhlíková trubička; senzor z uhlíkovej trubičky; posun vlnovej dĺžky; peak

## **Abstract**

This graduation thesis work is dedicated to the subject of measurement in automobile transport with the help of Bragg grid. The main aim is to design and create a sensor based on the findings described in the chapters 3,4,5 and 6. Other chapters of this work are dedicated to the draft, realization and implementation of optic sensors into traffic. Thank to them, vehicle speed is going to be evaluated.

There is a description of various kinds of optic fibres and their parameters in the first chapter. The second chapter contains a detailed description of Bragg's grid and its use. Optic sensors are described in third chapter. Nowadays, there are several ways to measure the speed in automobile transport. These can be found in chapter four. Chapters five and six discuss the concepts of optic sensor use in traffic which helped significantly in the optic sensor draft.

The practical section of this work encloses an analysis of measurement of one PDMS sensor, from which a design and implementation of optic sensor for measuring of the speed of vehicles is derived.

After the design and implementation of the sensors in traffic, the results are evaluated and furthermore, a relative mistake of the measuring in SW Matlab is calculated.

## **Key words**

FBG; PDMS sensor; Bragg grating; wavelength; optical fiber; implementation; speed; optic sensor; carbon tube; sensor from a carbon tube; wavelength shift; peak

## Zoznam použitých symbolov

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
<b>n</b>	-	Index lomu
<b>I</b>	W/ m <sup>2</sup>	Intenzita
<b><math>\lambda</math></b>	nm	Vlnová dĺžka
<b>E</b>	V/m	Intenzita elektrického poľa
<b>R</b>	-	Odrazivosť svetla
<b>v</b>	km/h	Rýchlosť
<b>f</b>	Hz	Frekvencia
<b>c</b>	m/s	Rýchlosť svetla vo vákuu
<b><math>\alpha</math></b>	°	Uhol
<b>s</b>	m	Dráha
<b>t</b>	s	Čas
<b><math>\Delta t</math></b>	s	Rozdiel časov
<b><math>\omega</math></b>	rad/s	Uhlová rýchlosť
<b>WB</b>	m	Rázvor vozidla
<b>k<sub>T</sub></b>	pm/°C	Teplotný koeficient
<b>GB</b>	nm	Veľkosť ochranného pásma
<b><math>\delta</math></b>	%	Relatívna chyba merania

## Zoznam použitých skratiek

Skratka	Význam
<b>CD</b>	Chromatická disperzia
<b>PMD</b>	Polarizačná módová disperzia
<b>DWDM</b>	Hustý vlnový multiplex
<b>GVD</b>	Skupinová rýchlosť disperzie
<b>FBG</b>	Vláknová Braggovská mriežka
<b>MWR</b>	Radar na milimetrových vlnách
<b>ITS</b>	Inteligentný dopravný systém
<b>CW</b>	Kontinuálny lúč laseru
<b>LN</b>	Niobát lithium
<b>RVR</b>	Relevancia vektorovej regresie
<b>LGC</b>	FBG s dlhou periódou
<b>LGE</b>	Vylepšený senzor o prevádzkovú frekvenciu
<b>WIM</b>	Váženie vozidiel v pohybe
<b>OTDR</b>	Meracie zariadenie optických vlákien
<b>GFRP</b>	Polymér zisilnený skleneným vláknom
<b>FOTS</b>	Optovláknový prenosový systém
<b>DTG®</b>	Organicky pokovené mriežky
<b>FRP</b>	Vláknový polymér
<b>FWHM</b>	Maximálna šírka v polovici maxima spektra odrazeného svetla
<b>TFWHM</b>	Tolerencia FWHM
<b>PDMS</b>	Polydimetylsiloxán material
<b>HP</b>	Filter typu horná prepust'
<b>PDMS 1 - 4</b>	FBG zapúzdrené do materiálu PDMS
<b>Peak</b>	Špička v grafe
<b>SNR</b>	Odstup signálu od šumu



# Obsah

Úvod.....	- 11 -
1 Optické vlákna.....	- 12 -
1.1 Typy optických vlákien .....	- 12 -
1.1.1 Multimódové vlákna so skokovou zmenou indexu lomu (MMF SI) .....	- 13 -
1.1.2 Gradientné vlákna s plynulou zmenou indexu lomu (MMF GI) .....	- 13 -
1.1.3 Single módové vlákna (SSMF) .....	- 14 -
1.1.4 Optické vlákno so skleneným jadrom a plastovým plášťom .....	- 15 -
1.1.5 Plastové optické vlákna (POF) .....	- 15 -
2 Optická vláknová Braggovská mriežka.....	- 17 -
3 Optické senzory.....	- 19 -
3.1 Optické senzory založené na snímaní intenzity.....	- 19 -
3.2 Optické senzory založené na modulácii vlnovej dĺžky .....	- 20 -
3.3 Optické senzory založené na modulovaní polarizácie.....	- 20 -
3.4 Optické senzory založené na modulovaní fáze .....	- 20 -
3.4.1 Mach-Zehnderov interferometer .....	- 20 -
3.4.2 Michelsonov interferometer .....	- 21 -
3.4.3 Fabry-Perotov interferometer .....	- 21 -
3.4.4 Sagnacov interferometer.....	- 22 -
4 Spôsoby merania rýchlosti vozidiel .....	- 23 -
4.1 Dopplerové meranie rýchlosti .....	- 23 -
4.2 Laserové meranie rýchlosti .....	- 23 -
4.3 Bodové meranie rýchlosti.....	- 24 -
4.4 Úsekové meranie rýchlosti .....	- 24 -
4.5 Experiment Dopplerovho laserového radaru.....	- 25 -
5 Koncepty monitorovania v automobilovej doprave pomocou FBG.....	- 27 -
5.1 Monitorovanie dopravy a stavu vozovky .....	- 27 -
5.2 Monitorovanie diaľnice pomocou optických senzorov .....	- 28 -
5.3 Koncept merania rýchlosti a hmotnosti vozidiel .....	- 29 -
5.4 Monitorovanie mostíku pomocou FBG senzorov .....	- 31 -
5.5 Využitie optických senzorov na sledovanie hustoty dopravy .....	- 32 -
5.6 Špeciálny vláknový optický senzor na váženie automobilov .....	- 33 -

5.7	Využitie FBG na meranie rýchlosti vozidiel a odhadu rázvoru vozidla.....	- 35 -
5.8	Analýza optických senzorov v doprave.....	- 37 -
5.9	Správanie piezoelektrických senzorov, vplyv teploty na meranie .....	- 38 -
5.10	Optovláknový senzor z FBG uložený v asfalte .....	- 39 -
5.11	OptiWIM® .....	- 41 -
6	Návrh FBG senzorov pre meranie rýchlosti.....	- 43 -
6.1	Analýza PDMS senzora vo vozovke .....	- 43 -
6.2	Návrh senzorového pásu z Braggovských mriežok.....	- 45 -
6.3	Výroba FBG senzorov z PDMS .....	- 47 -
6.3.1	Polydimethylsiloxan (PDMS) .....	- 51 -
6.4	Výroba senzoru z hliníkovej trubičky .....	- 51 -
6.5	Výroba senzoru z uhlíkovej trubičky .....	- 52 -
6.5.1	Uhlíkový materiál.....	- 53 -
6.6	Implementácia senzorov do vozovky .....	- 53 -
7	Spracovanie meraní po implementácii senzorov do vozovky .....	- 57 -
7.1	Spracovanie nameraných dát z PDMS senzorov.....	- 57 -
7.2	Spracovanie nameraných dát zo senzoru z hliníkovej trubičky .....	- 59 -
7.3	Spracovanie nameraných dát zo senzoru z uhlíkovej trubičky .....	- 61 -
8	Referenčné meranie pomocou optických brán .....	- 64 -
8.1	Vyhodnocovacia jednotka na detekciu prejazdov .....	- 64 -
8.2	Analýza merania.....	- 66 -
9	Meranie rýchlosti prechádzaných vozidiel.....	- 67 -
9.1	Návrh algoritmu na výpočet rýchlosti v SW Matlab.....	- 68 -
9.2	Výpočet rýchlosti z FBG senzorov v SW Matlab .....	- 70 -
9.3	Výpočet rýchlosti z referenčného merania v SW Matlab.....	- 71 -
9.4	Úspešnosť detekcie vozidiel zo senzorov.....	- 71 -
9.5	Presnosť merania rýchlosti FBG senzorov.....	- 72 -
9.6	Sumarizácia meraní rýchlosti z ostatných dní.....	- 75 -
	Záver .....	- 76 -
	Použitá literatúra .....	- 79 -

## Úvod

Súčasný dynamický rozvoj technológie optických vlákien má úzku súvislosť s využitím optických súčastí a obzvlášť optických vlákien v oblasti telekomunikácií a senzorovej techniky. Ak sa pozrieme do histórie, prvé náznaky o vývoji a použití nízko útlmových optických vlákien siahajú do šesťdesiatych rokov 20. storočia. S postupným vývojom technológie v nasledujúcich rokoch bolo možné použiť získané znalosti pre výrobu senzorov z optických vlákien. S ich výrobou došlo k rýchlemu rozšíreniu a následnému vývoju rôznych typov pre rôzne aplikácie.

Úvod tejto diplomovej práce je zameraný na popis optických vlákien využívané v dnešnej dobe a zobrazenie ich parametrov. Významnou kapitolou teoretickej časti práce je 2. a 3. kapitola. V druhej kapitole je podrobný popis Braggovskej mriežky, jej využitie, a vzťahy pre nastavenie centrálnej vlnovej dĺžky Braggovskej mriežky. Keďže cieľom práce je návrh senzora, prostredníctvom, ktorého sa bude vypočítavať rýchlosť, tretia kapitola sa zaoberá popisom optických senzorov a interferometrov.

V dnešnej dobe je na meranie rýchlosti vozidiel využívaných mnoho typov radarov. Štvrtá kapitola práce sa zaoberá práve tejto oblasti. Každý typ radaru je využiteľný na inom mieste, napríklad úsekové meranie radarom sa najčastejšie využíva v tuneloch alebo na diaľnici kde nie je možné prejsť na inú cestu.

Cieľom tejto práce je návrh senzoru na meranie rýchlosti, ktorý bude implementovaný do vozovky. Aby bol návrh jednoduchší a nedošlo k opakovaným chybám, ktoré už boli analyzované, bolo potrebné spracovať už zistené poznatky konceptov, v ktorých je podobná problematika riešená. Z týchto poznatkov boli následne vybrané vhodné informácie pri návrhu senzoru.

Praktická časť diplomovej práce sa zaoberá návrhom FBG senzora a jeho následnej implementácie do vozovky. Na začiatku praktickej časti je opis odozvy jedného PDMS senzora pri prejazde vozidla, pomocou ktorého budú vytvorené optovláknové senzory z FBG, ktoré budú pokrývať celú šírku vozovky. Po spracovaní výsledkov sa vyberie vhodný materiál pre implementáciu senzorov a bude realizovaná jeho výroba.

Ďalšia časť sa zaoberá implementáciou novovytvorených senzorov do vozovky na ulici Hlubočická v Ostrave.

Posledná časť diplomovej práce je venovaná praktickému overovaniu funkčnosti senzorov v premávke, spracovaním analýzy signálov implementovaných senzorov a výpočtu rýchlosti vozidiel.

# 1 Optické vlákna

Optické vlákna predstavujú od roku 2000 obrovskú revolúciu v oblasti moderných telekomunikačných systémoch. Tieto systémy sa neustále vyvíjajú. V nasledujúcich rokoch bude potreba zvýšiť interaktívnu komunikáciu na diaľku. Nároky na veľké vzdialenosti a stále sa zväčšujúce prenosové kapacity zapríčinili nutnosť vkladania optických opakovačov a zosilňovačov do optickej trasy pre kompenzáciu útlmu optického vlákna.

Naše vnímanie meniacich sa pracovných návykov a praktík musí obsahovať otázky o energetickej náročnosti miliónov serverov a osobných počítačov, ktoré zostanú bdelé 24 hodín každý jeden deň. [1]

Súčasná technológia posunuli komunikáciu v oblasti fotoniky na vyššiu úroveň, a to predovšetkým vďaka úspechu optických vlákien. Ich úspech spočíva predovšetkým s nízkymi stratami pri prenose, vysokou prenosovou rýchlosťou a nízkou optickou nelinearitou. Kombináciou týchto vlastností sa dosiahla komunikácia na veľké vzdialenosti. Dnes sa v oblasti komunikácie hromadne využíva poskytovanie integrovaných služieb, ako napríklad domáce bankovníctvo, nakupovanie cez internet, internetové služby, sledovanie online videí a podobne.

Stále tu, ale existuje obrovský priestor na zlepšenie v tejto oblasti. Optické vlákno bude musieť konkurovať aj iným dopravným prostriedkom, ako je rádiový medený kábel a satelitné spojenie. Napriek tomu sú optické vlákna v komunikačných systémoch bezpečnejšie.

Úplný odraz svetla je základom funkcie optických vlákien. Optické vlákno vedie z jedného miesta na druhé sériou úplných vnútorných odrazov podobne, ako môže byť vedený vystrelený náboj oceľovou rúrou. Lúče svetla sa odrážajú od vnútorných stien, pričom sledujú záhyby a obraty vlákna. Optické vlákna sa využívajú v dekoračných lampách alebo i ako osvetlenie prístrojov z jednej žiarovky na prístrojovej doske aut. Zubní lekári ich spolu s baterkou využívajú na osvetlenie požadovaných miest.

Hlavným dôvodom využívania v telekomunikáciách je vysoká kapacita prenášaných informácií. Optickým vláknom sa totiž prenášajú digitálne informácie. Tie pozostávajú z bitov tvorených jednotkami, kedy sa signál šíri a nulami, kedy sa signál naopak nešíri. V nich je zakódovaná informácia. Pri tomto procese informácií, na rozdiel od analógových elektrických sietí nie je až taká kritická kvalita jednotlivých bitov. Dôležité je len rozpoznať, či bol signál vyslaný alebo nie. V moderných informačných technológiách sú do vlákien laserom vyslané záblesky svetla. Keďže svetlo sa pri šírení pozdĺž vlákna úplne odráža od jeho stien, ich intenzita sa takmer nemení.

Dôležitým zariadením v optických systémoch je optický filter v ktorom je využívaná Braggovská mriežka. Braggovská mriežka nie je využívaná len v komunikačných systémoch, ale aj v oblasti senzorových aplikácií. Senzorové aplikácie v oblasti optiky sa využívajú dnes aj pri ťažení plynu či ropy, ale taktiež sa vývoj rozvinul aj pre biomedicínske aplikácie.

## 1.1 Typy optických vlákien

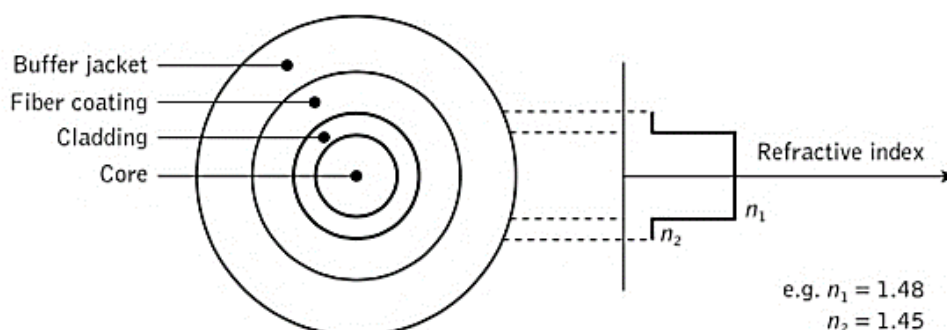
Optické vlákna sa líšia v závislosti na ich výkonové charakteristiky, ktoré závisia pri výrobe a príprave techniky. V niektorých prípadoch sa zdá, že vlákna ktoré boli vyrobené najlepšou technológiou za najlepších podmienok majú horšie výkonové charakteristiky ako ostatné. Je však dôležité poznamenať, že vysoko výkonné hmoty uvedené pre optické vlákna sú všeobecné a testované

v laboratóriách. Reálne výkonnostné hodnoty sú v súčasnosti veľmi blízke hodnotám nameraných v laboratóriách. To svedčí o zlepšeniach v posledných rokoch v oblasti výroby optických vlákien.

V súčasnosti je široko dostupný rad vysoko výkonných single módových vlákien založených na oxide kremičitom na prevádzku vlnových dĺžok v rozsahu 1260 až 1625 nm. [2]

### 1.1.1 Multimódové vlákna so skokovou zmenou indexu lomu (MMF SI)

Multimódové vlákna so skokovou zmenou indexu lomu môžu byť vyrobené buď z viackomponentných sklenených zlúčenín alebo dotovaného oxidu kremičitého. Tento typ vlákna môže mať celkom veľký priemer jadra a veľké numerické otvory na účinnejšie naviazanie svetla s inkohherentnými svetelnými zdrojmi, ako sú LED diódy. Výkonné charakteristiky tohto typu vlákna sa môžu značne líšiť v závislosti od použitého materiálu a spôsob výrobu. Vlákna z oxidu kremičitého majú najlepší výkon. [2] Štruktúra pre tento typ optického vlákna je zobrazená na obrázku 1.1.



Obrázok 1.1: Štruktúra multimódového vlákna so skokovou zmenou indexu lomu [2]

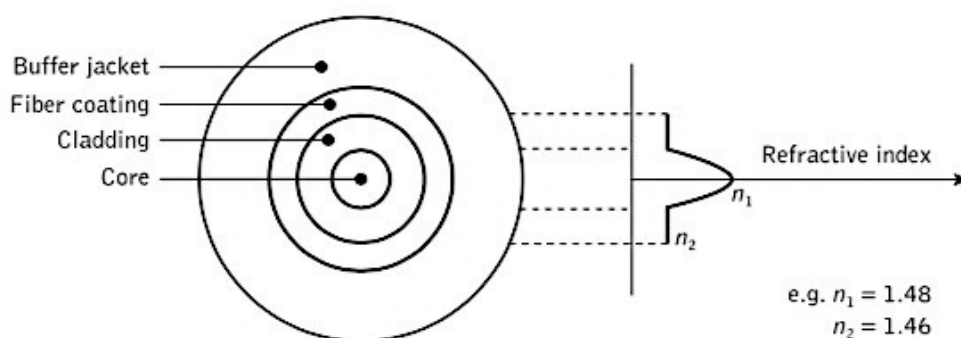
Tabulka 1.1: Základné parametre MMF SI

<b>Priemer jadra vlákna</b>	100 - 300 $\mu\text{m}$
<b>Priemer plášťa vlákna</b>	140 - 400 $\mu\text{m}$
<b>NA</b>	0,16 – 0,50

Útlm tohto typu vlákna je  $2,6 - 50 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$  pri vlnovej dĺžke 850 nm limitované absorpciou alebo útlmom. Pri vlnovej dĺžke 1310 nm je možné dosiahnuť útlm  $0,4 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$  [3].

### 1.1.2 Gradientné vlákna s plynulou zmenou indexu lomu (MMF GI)

Tieto vlákna sú vyrábané z rovnakého materiálu ako MMF SI. Výkonové charakteristiky týchto vlákien sú lepšie ako charakteristické vlastnosti SI vlákien v dôsledku stupňovania indexu lomu a menšieho útlmu. Tieto vlákna majú zvyčajne menší priemer jadra ako MMF SI, čím je dosiahnutá väčšia tuhosť a odolnosť vlákna voči ohybu. [2]



Obrázok 1.2: Štruktúra gradientného vlákna s plynulou zmenou indexu lomu [2]

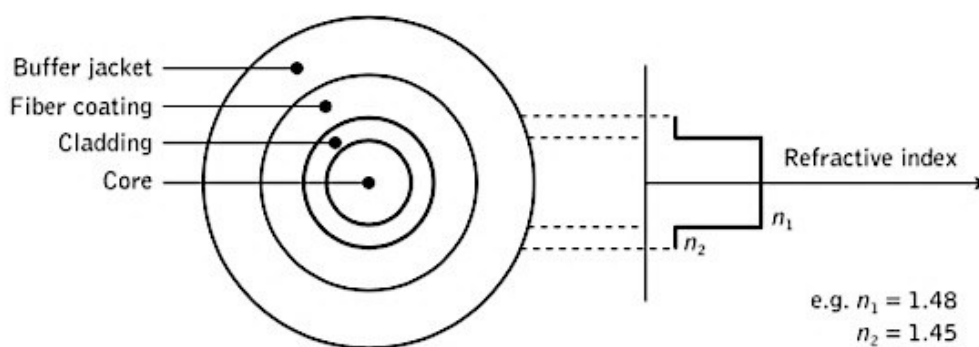
Tabulka 1.2: Základné parametre MMF GI

<b>Priemer jadra vlákna</b>	50 - 100 $\mu\text{m}$
<b>Priemer plášťa vlákna</b>	125 - 150 $\mu\text{m}$
<b>NA</b>	0,2 – 0,3

Pri vlnovej dĺžke 850 nm je útlm tohto typu vlákna 2 – 10 dB·km<sup>-1</sup>. Najmenšie straty 0,4 a 0,25 dB·km<sup>-1</sup> je možné dosiahnuť pri vlnových dĺžkach 1310 nm a 1550 nm. Hoc sa tieto vlákna používali pre stredne dlhé vzdialenosti, teraz sú najvhodnejšie pre aplikácie s krátkymi, strednými až vysokými šírkami pásma. Používajú nekoherentné alebo koherentné multimódové zdroje žiarenia.

### 1.1.3 Single módové vlákna (SSMF)

Na obrázku 1.3 je zobrazené štandardné single-módové (jednovidové) vlákno, ktoré sa zvyčajne skladá zo step-indexového profilu a je v odporúčaní G.652.A. Takéto vlákna sa tiež označujú ako vlákna bez disperzie, pretože na vlnovej dĺžke 1310 nm ma nulovú disperziu. Hoci tento typ vlákna môže byť využívaný aj na vlnovej dĺžke 1550 nm, nie je optimalizovaný pre pásma C a L. Práve pre tieto pásma sa vykazujú vysoká disperzia od 16 do 20 ps·nm<sup>-1</sup>·km<sup>-1</sup>.



Obrázok 1.3: Štruktúra jednovidového vlákna [2]

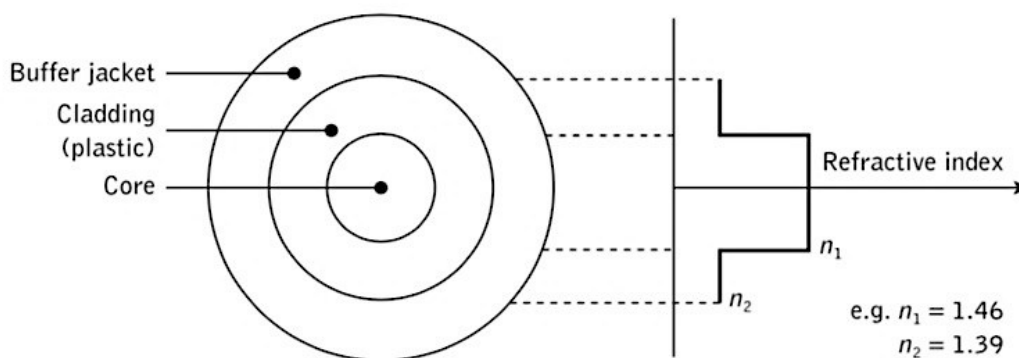
Tabulka 1.3: Základné parametre SIMF

<b>Priemer jadra vlákna</b>	7 - 11 $\mu\text{m}$
<b>Priemer plášťa vlákna</b>	125 $\mu\text{m}$
<b>NA</b>	0,08 – 0,15

Útlm jednovlňových vlákien sa pohybuje od 2 do 5 dB·km<sup>-1</sup> pri vlnovej dĺžke 850 nm. Tieto vlákna sú ideálne pre aplikácie s vysokou šírkou pásma a pre stredne až dlhé vzdialenosti, ktoré využívajú laserové zdroje žiarenia. [2]

#### 1.1.4 Optické vlákno so skleneným jadrom a plastovým plášťom

Tieto optické vlákna sú multimódové vlákna vyrobené s krokovým alebo gradientným profilom indexu. Vlákno pozostáva zo skleneného jadra obaleného do plastového plášťa. Štruktúra vlákna je zobrazená na obrázku 1.4. Tieto vlákna vykazujú nižšie straty spôsobené žiarením ako kremičité vlákna pokryté oxidom kremičitým, preto majú lepší výkon v určitých prostrediach. Plastové vlákna sú lacnejšie v porovnaní so sklenenými.



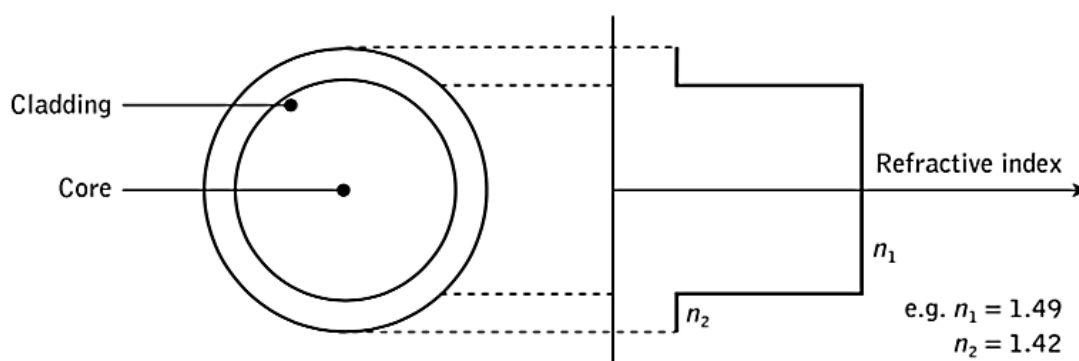
Obrázok 1.4: Štruktúra vlákna so skleneným jadrom a plastovým plášťom [2]

#### 1.1.5 Plastové optické vlákna (POF)

Tieto vlákna majú ako jadro tak aj plášť vyrobené z organických polymérov. Tieto vlákna vykazujú veľké priemery jadra a plášťa. Sú zvyčajne menej nákladné na výrobu a je s nimi lepšia manipulácia ako so sklenenými vláknami. Avšak ich výkon je obmedzený. Majú väčšiu numerickú aparatúru, kvôli veľkému rozdielu indexu lomu jadra a plášťa, čo umožňuje ľahšie navedenie svetla do vlákna. Prvé plastové vlákna vykazovali útlm približne 500 dB·km<sup>-1</sup>.

Tabuľka 1.4: Základné parametre plastových vlákien

<b>Priemer jadra vlákna</b>	125 - 1880 μm
<b>Priemer plášťa vlákna</b>	1250 - 2000 μm
<b>NA</b>	0,3 – 0,6



Obrázok 1.5: Štruktúra plastového optického vlákna [2]



## 2 Optická vláknová Braggovská mriežka

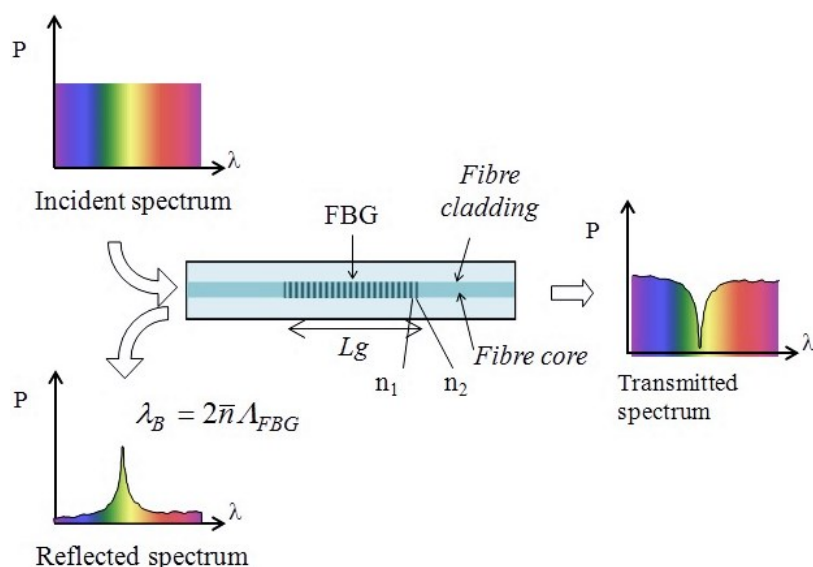
Pracovný princíp je založený na periodickej zmene indexu lomu jadra vlákna, ktorý slúži ako selektívny filter pre vlnovú dĺžku s centrálnou odrazovou vlnovou dĺžkou. Snímacia informácia je zakódovaná v optickom spektre, ktoré sa odráža v Braggovskej mriežke. Okolité teplota alebo tlak spôsobuje posun centrálnej Braggovskej vlnovej dĺžky. FBG je jednou z najpoužívanějších technológií v komerčných aplikáciách v oblastiach optických a kompozitných materiálov, senzorov teploty a senzorov tlaku vďaka niekoľkým výhodám oproti iným technológiám a to predovšetkým: presnosť a rozsah, nízka hmotnosť, malá veľkosť, referencie, multiplexovanie, odolnosť voči elektromagnetickému rušeniu a odolnosť voči životnému prostrediu. Tenzia alebo pnutie mriežky môže viesť k zmene periódy, keď sa FBG deformuje zmenou vonkajšej teploty alebo tlakom. Avšak keď sa vyžadujú merania v teréne, použitie neochránených FBG nie je praktické. Následne bolo vyvinutých množstvo rôznych konštrukcií, ktoré umožňujú jednoduchšiu inštaláciu FBG. Boli vyvinuté aj senzory zamerané na iné merania než na tlak (deformáciu) a teplotu.

Braggovská mriežka pôsobí ako optický filter z dôvodu existencie tzv. zastavovacieho pásma, frekvenčnej oblasti, v ktorej sa časť dopadajúceho svetla odrazí späť. [5]

Periodický charakter zmeny indexových variácií spája dopredné a spätné šíriace sa vlny na vlnových dĺžkach v okolí Braggovskej vlnovej dĺžky a ako výsledok poskytuje frekvenčne závislú odrazivosť k príhodnému signálu cez šírku pásma určenou silou Braggovskej mriežky.

Braggovská mriežka funguje v podstate ako odrazový filter. Napriek tomu, že používanie takýchto mriežok na kompenzáciu rozptýlenia bolo navrhnuté v osemdesiatych rokoch minulého storočia, bola táto technológia dostatočne rozšírená pre praktické použitie až deväťdesiatych rokoch minulého storočia. [6]

Jednoduché vysvetlenie princípu fungovania Braggovskej mriežky je zobrazené na obrázku 2.3.



Obrázok 2.3: Princíp optickej Braggovskej mriežky [5]

Pri každej periodickej zmene lomu sa odráža malé množstvo svetla. Všetky odrazené svetelné signály sa koherentne kombinujú s jedným veľkým odrazom pri určitej vlnovej dĺžke, keď je perióda

mriežky približne polovica vlnovej dĺžky vstupného svetla. Toto sa označuje ako Braggovský stav a vlnová dĺžka, pri ktorej dochádza k tomuto odrazu, sa nazýva Braggovská vlnová dĺžka. Svetelné signály na vlnových dĺžkach iných ako Braggovská vlnová dĺžka, ktoré nie sú fázovo zosúladené, sú v podstate transparentné.

Preto sa svetlo šíri cez mriežku so zanedbateľným útlmom alebo zmenou signálu. Len tie vlnové dĺžky, ktoré spĺňajú Braggovský stav sú ovplyvnené a výrazne sa odrážajú. Schopnosť presne nastaviť a udržiavať vlnovú dĺžku mriežky je základným znakom a výhodou optickej Braggovskej mriežky. Centrálna vlnová dĺžka odrazenej zložky spĺňa Braggovský vzťah:

$$\lambda_{refl} = 2n\Lambda. \quad (2.2)$$

Index lomu predstavuje parameter  $n$  a  $\Lambda$  je perióda mriežky. Nastavenie odrazu vlnovej dĺžky je možné viacerými metódami. Prvá metóda ladenia môže byť tzv. deformácia mriežky, kde Braggovskú mriežku napíname, čím sa predlžuje optické vlákno a tým sa mení perióda mriežky. Druhou metódou ladenia môže byť vplyv teploty na mriežku, kde pri zvyšovaní teploty sa mriežka začne naťahovať a naopak pri znižovaní teploty sa mriežka začne skracovať. Týmto spôsobom sa opäť mení perióda Braggovskej mriežky. Nastavovanie vlnovej dĺžky Braggovskej mriežky môžeme popísať rovnicou:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = (1 - p_e)\varepsilon + (\alpha_\Lambda + \alpha_n)\Delta T, \quad (2.3)$$

kde  $\Delta\lambda$  je posunutie vlnovej dĺžky,  $\lambda_0$  predstavuje vlnovú dĺžku,  $p_e$  je foto-elastický koeficient a  $\varepsilon$  znamená deformáciu mriežky. Koeficient tepelnej rozťažnosti je  $\alpha_\Lambda$  a  $\alpha_n$  popisuje zmeny v indexe lomu – termo-optický koeficient.

Senzory optických vlákien založené na optickej Braggovskej mriežke (FBG) poskytujú presné a spoľahlivé vzdialené merania ako napríklad teploty, deformácií, tlaku alebo rýchlosti. Sú odolné proti elektromagnetickému rušeniu. Braggovské mriežky sa vo veľkej miere využívajú v telekomunikáciách a ich výroba je dnes nákladovo efektívna. Senzory založené na Braggovskej mriežke nájdu veľa priemyselných aplikácií v kompozitných štruktúrach používaných v civilnom inžinierstve, leteckej, železničnej, vesmírnej a námornej oblasti. Drobné snímače založené na FBG vložené do kompozitného materiálu môžu poskytnúť informácie o vytvrdzovaní polymérom (deformácia, teplota, index lomu) elegantným a neinštruktívnym spôsobom. Vďaka použitiu týchto snímačov boli dosiahnuté veľké vylepšenia v procesoch kompozitného spracovania. Môžu sa použiť aj na monitorovanie "zdravia" kompozitnej štruktúry, na zisťovanie nárazu napríklad na hodnotenie letovej spôsobilosti lietadla. [7]

### 3 Optické senzory

Technológia senzorov z optických vlákien sa vyvíja už viac ako 40 rokov a vyústila do výroby rôznych zariadení vrátane optických gyroskopov, snímačov teploty, tlaku, vibrácií a chemických sond. Pretože senzory z optických vlákien sú dielektrické zariadenia, môžu sa používať vo vysokonapäťových, vysokoteplotných alebo korozívnych prostrediach. Okrem toho sú tieto snímače kompatibilné s komunikačnými systémami a majú kapacitu na vykonávanie diaľkového snímania. Nedávno sa skúmanie v oblasti zameralo na vývoj nových materiálov s nelineárnymi optickými vlastnosťami pre dôležité potenciálne aplikácie vo fotónii. Príkladmi týchto materiálov sú konjugované polovodivé polyméry, ktoré kombinujú optické vlastnosti s elektronickými vlastnosťami polovodičov. Navyše tieto vodivé polyméry majú fotoluminiscenčné a elektroluminiscenčné vlastnosti, čo ich robí atraktívne pre aplikácie v optoelektronike.

Senzory optických vlákien boli vyvinuté na meranie širokej škály fyzikálnych vlastností, ako sú chemické zmeny, pnutie, elektrické a magnetické polia, teplota, tlak, otáčanie, posunutie (poloha), žiarenie, prietok, hladina kvapaliny, a farby. Senzory s optickými vláknami sú zariadenia, ktoré môžu pracovať v nepriaznivých podmienkach, v ktorých majú bežné elektrické a elektronické senzory ťažkosti. V porovnaní s inými typmi snímačov majú senzory optických vlákien rad výhod ako napríklad malé rozmery, prístup do normálne neprístupných oblastí, diaľkové snímanie, odolnosť voči rádiovým rušeniam a elektromagnetickému rušeniu, nepodliehajú korózií, vysoká citlivosť, dynamický rozsah, možnosť prepojenia s komunikačnými systémami.

Základné súčasti optických vláknových senzorov sú optický zdroj, snímač a prijímač. Ako optický zdroj v týchto snímačoch sa často používajú lasery alebo LED diódy. Na výstupe senzorového systému sa používa fotodetektor na detekciu optického signálu.

Vo všeobecnosti môžu byť senzory z optických vlákien vhodne klasifikované podľa spôsobu, akým sa optické vlákno používa. Tieto snímače môžu byť funkčne klasifikované ako intrinzné a extrinzné.

Intrinzné senzory menia intenzitu svetla vracajúceho sa zo senzoru, ale na rozdiel od prenosového, odrazového a ohybového prístupu nemusí dochádzať k žiadnemu pohybu či posunutiu. Intrinzné senzory využívajú chemické vlastnosti skla jadra optického vlákna pre dosiahnutie senzorovej činnosti. Hlavnými mechanizmami sú absorpcia, rozptyl, fluorescencia, zmena indexu lomu alebo polarizácia.

U extrinzných senzorov je optické vlákno použité k väzbe svetla, do alebo z oblasti, v ktorej je svetlený lúč ovplyvňovaný meranou veličinou. Tento externý proces, ale môže byť zachytený do vlákna niekoľkými vhodnými spôsobmi a to pomocou zvárania spojov, lepením alebo mechanickými spojkami.

#### 3.1 Optické senzory založené na snímaní intenzity

Senzory optických vlákien založené na snímaní intenzity závisia od signálu, ktorý prechádza určitou stratou. Vyrábajú sa pomocou zariadenia na konverziu toho, čo sa meria, na silu, ktorá ohýba vlákno a spôsobuje zoslabenie signálu. Iné spôsoby, ako zoslabiť signál, je absorpcia alebo rozptyl. Senzor založený na intenzite vyžaduje viac silnejší zdroj žiarenia a preto zvyčajne používa veľké multimodové jadro.

### 3.2 Optické senzory založené na modulácii vlnovej dĺžky

Modulované snímače s vlnovou dĺžkou používajú zmeny v detekcii vlnovej dĺžky svetla. Senzory fluorescencie a senzory z Braggovských mriežok sú príklady senzorov modulovaných vlnovou dĺžkou. Fluorescenčné vláknové senzory sa široko používajú na lekárske aplikácie, chemické snímanie a merania fyzických parametrov, ako je teplota, viskozita a vlhkosť. Najpoužívanejším senzorom založeným na vlnovej dĺžke sú Braggovské optovláknové senzory. Tieto senzory sa vytvárajú konštrukciou periodických zmien indexu refrakcie v jadre optického vlákna. Táto periodická zmena indexu lomu sa zvyčajne vytvára vystavením jadra vlákna silnému interferenčnému žiareniu. Takto vytvorená variácia indexu lomu tvorí interferenčný vzor, ktorý funguje ako mriežka.

### 3.3 Optické senzory založené na modulovaní polarizácie

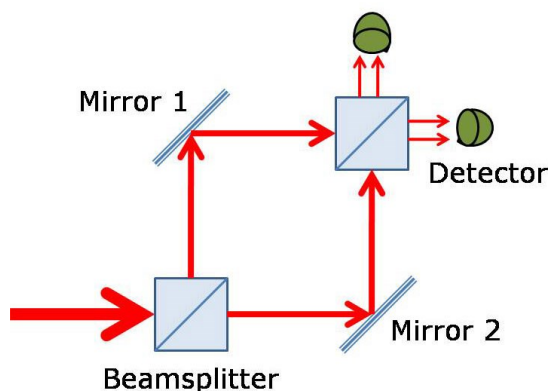
Smer časti elektrického poľa a svetelného poľa je definovaný ako polarizačný stav svetelného poľa. Rôzne typy polarizačných stavov sú lineárne, eliptické a kruhové polarizačné stavy. Pre stav lineárnej polarizácie sa počas elektrického šírenia svetla stále nachádza ten istý smer elektrického poľa. Pri stave eliptickej polarizácie sa mení smer elektrického poľa počas šírenia svetla. Index lomu vlákna sa mení vtedy, ak je vystavený deformácií alebo pnutiu. Preto existuje indukovaný fázový rozdiel medzi rôznymi smermi polarizácie. Tento jav sa nazýva fotoelastický efekt. Navyše index lomu vlákna, ktorý prechádza určitým pnutím alebo deformáciou, sa nazýva indukovaný index lomu. Indikovaný index lomu sa mení so smerom aplikovaného pnutia alebo deformácie. Preto existuje indukovaný fázový rozdiel medzi rôznymi smermi polarizácie.

### 3.4 Optické senzory založené na modulovaní fáze

Fázovo modulované snímače využívajú zmeny vo fáze detekcie svetla. Optická fáza svetla prechádzajúca vláknom je modulovaná detekovaným poľom. Táto fázová modulácia sa potom detekuje interferometricky, porovnaním fázy svetla v signálnom vlákne s hodnotou v referenčnom vlákne. V interferometrii sa svetlo rozdelí na dva lúče. Jeden lúč je vystavený snímanému prostrediu a prechádza fázovým posunom a druhý je izolovaný od snímaného prostredia a používa sa ako referencia. Akonáhle sú zväzky rekombinované, navzájom sa rušia. Mach-Zehnderov, Michelsonov, Fabry-Perot, Sagnacov, polarimetrické a mriežkové interferometre patria medzi najčastejšie používané interferometre.

#### 3.4.1 Mach-Zehnderov interferometer

Mach-Zehnderov interferometer je zložený z dvoch typoch zrkadiel. Jeden typ sú polopriepustné a druhý typ sú plnohodnotné zrkadlá. Lúč vyžarovaný zo zdroja žiarenia je po prechode prvým polopriepustným zrkadlom rozdelený na dva lúče. Oba lúče sa ďalej odrazia od plnohodnotných zrkadiel a spoja sa následne v druhom polopriepustnom zrkadle, z ktorého už jeden výsledný lúč prechádza do detektora, kde je vyhodnotený fázový posun. Princíp je možné vidieť na obrázku 3.1.

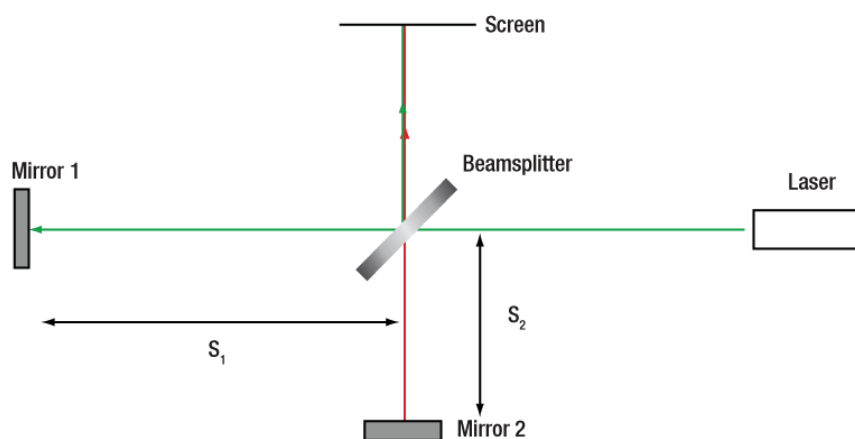


Obrázok 3.1: Princíp Mach-Zehnderovho interferometra

### 3.4.2 Michelsonov interferometer

Je to zariadenie, ktoré vytvára interferenciu medzi dvoma lúčmi. Lúč zo zdroja dopadá na polopriepustné zrkadlo pod uhlom  $45^\circ$ , kde 50% žiarenia prejde cez toto polopriepustné zrkadlo a 50% žiarenia sa odrazí. Týmto spôsobom sa pôvodný lúč zo zdroja žiarenia rozdelí na dva, kde prvý lúč pri priechove polopriepustným zrkadlom putuje ďalej a následne sa odrazí od plnohodnotného zrkadla (Mirror 1) a smeruje späť do detektora. Druhý lúč, ktorý sa od polopriepustného zrkadla odrazil, smeruje k plnohodnotnému zrkadlu (Mirror 2), od ktorého sa následne odrazí a putuje späť do detektora. Rozdiel je v tom, že medzi polopriepustné zrkadlo od ktorého je lúč odrazený a plnohodnotné zrkadlo (Mirror 2) sa vkladá kompenzačná doska. Ak posunieme zrkadlo o vzdialenosť  $d$ , dráhový rozdiel bude:

$$\Delta l = 2l \quad (3.1)$$



Obrázok 3.2: Princíp Michelsonovho interferometra

### 3.4.3 Fabry-Perotov interferometer

Fabry-Perotov interferometer je založený na interferencii viacerých odrazov svetelného lúča od dvoch povrchov tenkej dosky. Podmienkou pre maximálnu interferenciu pre každú vlnovú dĺžku je:

$$2d \sin \theta = n\lambda, \quad (3.2)$$

kde  $n$  je celé číslo a  $d$  je hrúbka dosky. Je zrejmé, že táto podmienka je splnená množstvom vlnových dĺžok, ktoré sú násobkami  $2\pi$  a maximum intenzity určuje vzťah:

$$I_{MAX} = E^2, \quad (3.3)$$

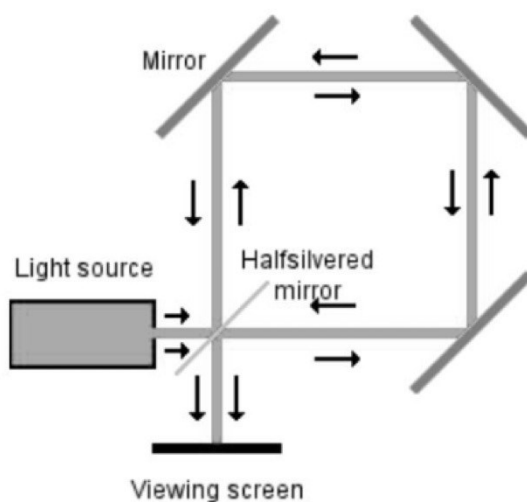
$E$  predstavuje intenzitu elektrického poľa. Ak je odrazivosť od povrchov dosiek  $R$ , potom je intenzita medzi maximami je:

$$I = \frac{(1-R)^2}{(1+R)^2}. \quad (3.4)$$

Keď sa odrazivosť povrchu zväčšuje, intenzita medzi maximami klesá, čím sa zvyšuje ostrosť interferometra.

#### 3.4.4 Sagnacov interferometer

Sagnacov interferometer vznikol na základe Sagnacovho javu, ktorý vzniká vtedy ak sa dve elektromagnetické vlny šíria proti sebe navzájom. Jedna vlna sa šíri v smere hodinových ručičiek a zas proti smere hodinových ručičiek po uzavretej dráhe. Na túto dráhu môže byť použitá cievka z optického vlákna a túto dráhu prejdú vlny za rôzny čas. Tento jav môže nastať, keď cievka rotuje v priestore vzhľadom na inú inerciálnu súradnicovú sústavu. Následný rozdiel časov prechodov elektromagnetických vln cez cievku sa prejaví ako posunutie interferenčného obrazca. Ak sú frekvencie vln rôzne vytvorí sa medzi nimi fázový posun. Na základe fázového posunu je možné v detektore detekovať interferenčné minimá a maximá. Posun je úmerný uhlovej rýchlosti otáčania cievky. Jednoduché zobrazenie je na obrázku 3.3.



Obrázok 3.3: Princíp Sagnacovho interferometra

## 4 Spôsoby merania rýchlosti vozidiel

V automobilovej doprave existuje množstvo druhov zariadení, ktorými môžeme dohliadnuť na rôzne situácie. Prostredníctvom takýchto zariadení potom vieme určiť napríklad:

- a) Rýchlosť vozidla
- b) Klasifikáciu vozidiel
- c) Hmotnosť vozidiel
- d) Identifikáciu vlastníka vozidla podľa evidenčného čísla vozidla

Na meranie rýchlosti automobilov sa často používajú detektory založené na vyžarovaní s pomocou video detektorov.

Rýchlosť a jej určenie v cestnej doprave je veľmi dôležitým a potrebným aspektom. Vďaka meraniu rýchlosti aut, môžeme zaistiť vyššiu bezpečnosť na cestách. Zo štatistík vyplýva, že nedodržiavanie maximálnej povolenej rýchlosti je najčastejší priestupok v doprave. Miesta na meranie dopravy sú rôzne. Detektory na meranie rýchlosti môžeme nájsť v obci alebo mimo nich, na železničnom priecestí, v tuneloch, alebo existuje tzv. úsekové meranie rýchlosti.

### 4.1 Dopplerové meranie rýchlosti

Tento druh merania je založený na zmene frekvencie elektromagnetického žiarenia pri relatívnom pohybe zdroja žiarenia. Objaviteľom tohto javu je Christian Doppler. Zdroj vysiela elektromagnetické žiarenie, ktoré sa následne odráža od karosérie vozidla späť k detektoru (zdroju).

Frekvencia signálu, ktorý je odrazený od pohybujúceho sa automobilu, sa od frekvencie vysiadaného signálu líši o hodnotu Dopplerovského posunu. Tá je úmerná rýchlosti meraného vozidla. Túto rýchlosť vieme potom vypočítať z rovnice:

$$v = \frac{cf_d}{2f_s \cos \alpha'} \quad (4.1)$$

kde  $c$  je rýchlosť svetla,  $f_d$  je Dopplerovská frekvencia (rozdiel frekvencie medzi frekvenciou odrazeného a vysiadaného signálu),  $f_s$  je frekvencia vysiadaného signálu a uhol  $\alpha$  sa nachádza medzi osou anténneho zväzku merača rýchlosti a vektorom rýchlosti (smer jazdy) meraného automobilu. [8]

### 4.2 Laserové meranie rýchlosti

Tento typ merania rýchlosti sa stáva čoraz viac obľúbeným. Hlavným dôvodom je rýchlosť merania, ktorá sa pohybuje okolo 0,5 sekundy. Za tento krátky čas vodič nemá šancu spomaliť na predpísanú rýchlosť. Laserové meranie rýchlosti je možné na vzdialenosť až 1800 metrov.

Princíp tohto merania spočíva v tom, že v hľadáči si zameria vozidlo, ktorého chceme vedieť rýchlosť a spustí sa meranie. Po spustení merania sú vysiadané infračervené impulzy o vlnovej dĺžke 904 nm. Tie sa odrazia od vozidla späť k zdroju žiarenia. Tento cyklus sa opakuje približne 68 až 3200 krát za sekundu. Zariadenie na základe času, odrazeného impulzu od vozidla vypočíta rýchlosť.



Obrázok 4.1: Zariadenie na meranie rýchlosti pomocou laseru

### 4.3 Bodové meranie rýchlosti

Tento typ merania je jedným z najčastejšie používaných v automobilovej doprave. Princíp spočíva v tom, že rýchlosť sa meria z jedného určeného bodu. Meracie prístroje sú založené na vyžarovanom princípe. Najčastejšie na Dopplerovom princípe a na pomoc slúži video záznam. Tento typ merania môže mať statické vyhotovenie, že sú pevne umiestnené ku krajnici vozovky, alebo mobilné ktoré sa dajú premiestňovať a vyžaduje obsluhu.



Obrázok 4.2: Radar, ktorý pracuje na princípe bodového merania

### 4.4 Úsekové meranie rýchlosti

Meranie sa vykonáva na vopred stanovenom mieste, najčastejšie v tuneloch alebo diaľnici kde auto nemôže zastaviť, kvôli ovplyvneniu merania. Na merania sa používajú video kamery. Princíp spočíva v tom, že na meranom úseku zaznamenávajú kamery každé vozidlo pri vjazde do tohto úseku a taktiež na výjazde z tohto úseku. Systém je schopný rozpoznať evidenčné číslo auta a na jeho základe vypočítať rozdiel čase pri vjazde a výjazde z meraného úseku. Túto rýchlosť potom môžeme vypočítať zo vzťahu:

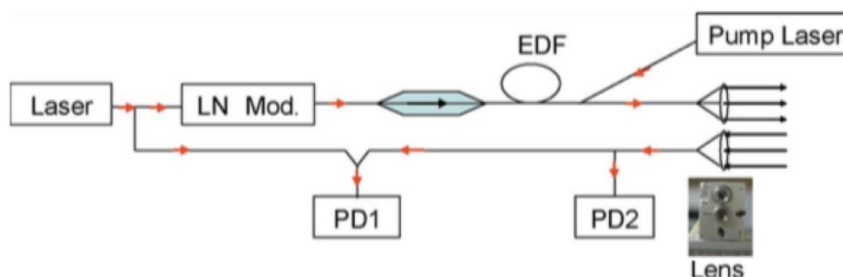
$$v = \frac{s}{\Delta t}, \quad (4.2)$$



kde  $v$  je priemerná rýchlosť vozidla,  $s$  je vzdialenosť medzi vjazdom a výjazdom a  $\Delta t$  je rozdiel medzi časom vjazdu a výjazdu z úseku.

#### 4.5 Experiment Dopplerovho laserového radaru

Hoci laserový radar má lepšiu viditeľnosť než MWR (radar na milimetrových vlnách), jeho výkonnosť je ešte potrebné ďalej vylepšiť. Pri konštrukcii vozidla s ITS (inteligentný dopravný systém) je potrebný relatívny rozsah rýchlosti, azimutu a zvýšeniu potenciálnych prekážok. Na obrázku 4.3 je znázornená schéma experimentu na overenie metódy na meranie cieľového rozsahu a rýchlosti. Laserové zariadenie vyrábané spoločnosťou DenseLight Corporation so šírkou 2 kHz sa používa ako svetelný zdroj pre laserový radarový systém na zvýšenie presnosti merania rýchlosti. [9, 10]

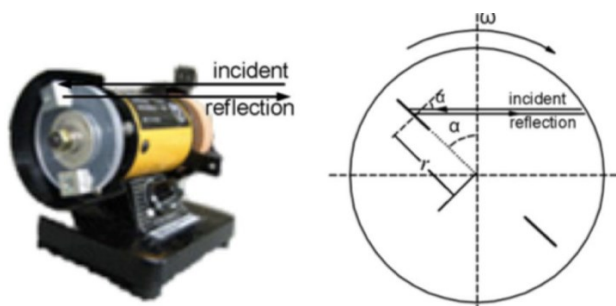


Obrázok 4.3: Schéma experimentu [9]

Zdroj svetla by sa mal polarizovať, ak sa použije Dopplerov signál na meranie cieľovej rýchlosti. Vlnová dĺžka lasera bola zvolená na 1550 nm, pretože je ľahko zosilnená zosilňovačmi. Maximálny výstupný výkon lasera je 5 mW, ak pracuje v režime CW. Výstup CW svetla z lasera je rozdelený na dve časti, z ktorých 99% je poslaných do modulátora z niobát lítia (LN) a zvyšok sa používa ako referenčný signál pri koherentnej detekcii. Výkon zosilneného lasera je takmer 0,9 W. Zosilnené laserové svetlo sa posiela do cieľa cez kolimátorovú šošovku ohniskovej vzdialenosti 4,6 mm, uhol divergencie 2,26 mrad a numerická apertúra je 0,53. Cieľom je odrazový štít, ktorý má sférickú štruktúru. Pomocou tejto štruktúry je dosiahnuté aby bolo svetlo odrazené späť odkiaľ prišlo. Odrazový štít je pripevnený na elektrickú brúsku približne 3 m od transmisnej šošovky. Otáčanie elektrickej brúsky generuje Dopplerov efekt. Predpokladá sa, že brúska sa otáča s uhlovou rýchlosťou  $\omega$  a dopadajúce laserové svetlo má uhol priechodu, smerom k normálnemu smeru odrážajúceho listu. Potom rýchlosť dopadajúceho svetla v opačnom smere bude:

$$v = \omega r \cos \alpha, \quad (4.2)$$

kde  $r$  je vzdialenosť od bodu dopadu k stredu brúsneho taniera.



Obrázok 4.4: Ukážka odrazovej dosky pripevnenej na elektrickú brúsku [9]

Meraná Dopplerovská frekvencia sa rovná potom:

$$f_D = \frac{2\omega r \cos\alpha}{\lambda_t}. \quad (4.3)$$

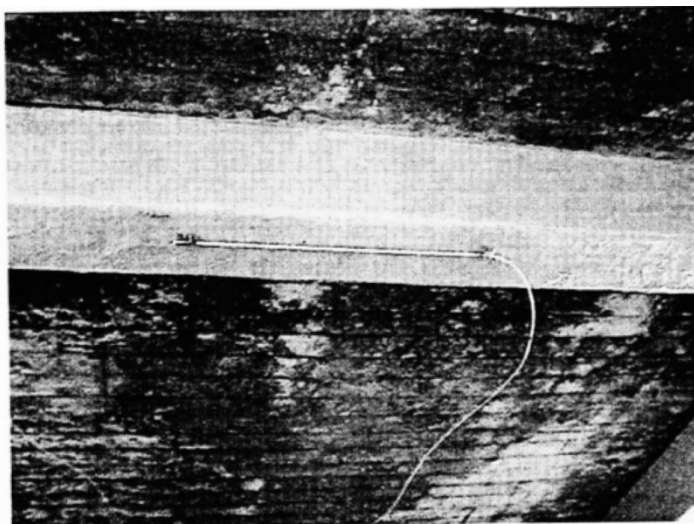
Na prijímacom konci je spojovacia šošovka, ktorá je rovnaká ako kolimátorová šošovka na strane prenosu. Potom odrazený laser je rozdelený na dve časti. V dôsledku nedostatku optickej zložky bol v tomto experimente použitý optický rozdeľovač 90:10. Prijatý signál je demultiplexovaný do dvoch skupín. Tieto sa používajú na výpočet korelačnej funkcie pomocou kódu modulácie. Na brúsny kotúč elektrickej brúsky sa pripevnil senzor rýchlosti na meranie priemernej rýchlosti otáčania brúsky. Keďže snímač rýchlosti poskytuje hrubé rozlíšenie, získaná rýchlosť je konštantná. Rýchlosť dosiahnutá Dopplerovým laserovým radarom má malé množstvo výkyvov, pretože brúska sa nerotuje rovnomerne. [9,10]

## 5 Koncepty monitorovania v automobilovej doprave pomocou FBG

Jedným z požadovaných výsledkov dopravných senzorov FBG je schopnosť konsolidovať viacero konvenčných systémov - senzorov premávky, v jednom súbore takmer identických FBG dopravných senzorov na extrahovanie údajov vo viacerých oblastiach štúdia. To prináša niekoľko výhod vrátane predĺženia životnosti systému, bezpečnosti vodiča, zjednodušenej inštalácie. Dopravné FBG senzory majú všetky tradičné výhody optických vlákien, vrátane elektrickej izolácie, zvýšenej šírky pásma, nižšej straty, zníženej veľkosti a hmotnosti a odolnosti voči rádiovému a elektrickému rušeniu.

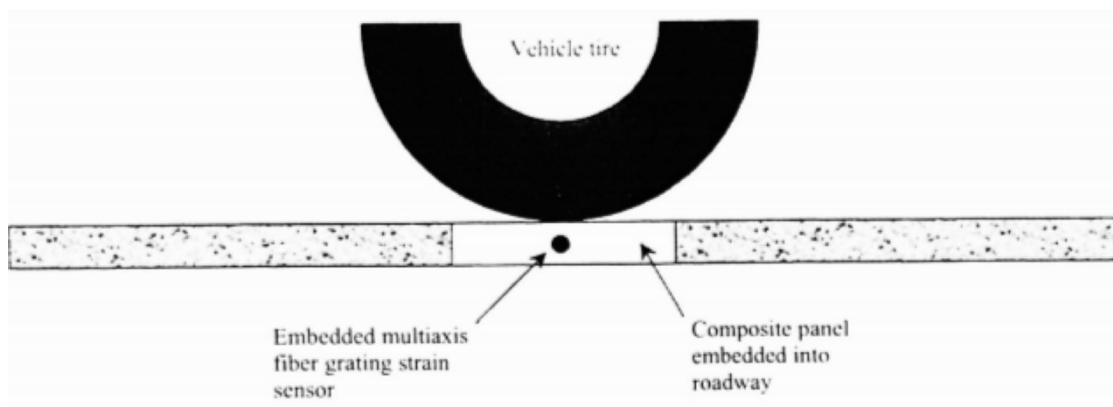
### 5.1 Monitorovanie dopravy a stavu vozovky

V tomto článku sa rieši prevažne zaťaženie mosta automobilmi. Konkrétne sa tento koncept používa na moste Horsetail Falls Bridge v Oregone (Columbia). Tento most vybavili niekoľkými vláknovými senzormi vrátane Michelsonovho interferometra.



Obrázok 5.1: Inštalácia senzora na most [11]

Prvá koncepcia WIM využíva "inteligentné" mostové ložisko so zabudovanými snímačmi deformácie s multiaxiálnymi vláknami. Na váženie vozidla v pohybe je vložený kompozitný nákladový článok podobný tomu, ktorý sa používa v ložisku mosta. Do tohto snímača zaťaženia je zabudovaný jeden alebo viacero snímačov napätia s multiaxiálnymi vláknami, ktoré sú schopné detekovať priečne deformácie. Keď vozidlo prechádza cez panel, snímač (senzor) meria deformáciu, pre každú z náprav vozidla a súčet údajov o celkovej hmotnosti. [11]



Obrázok 5.2: Ukážka konceptu priečneho uloženia FBG senzora [11]

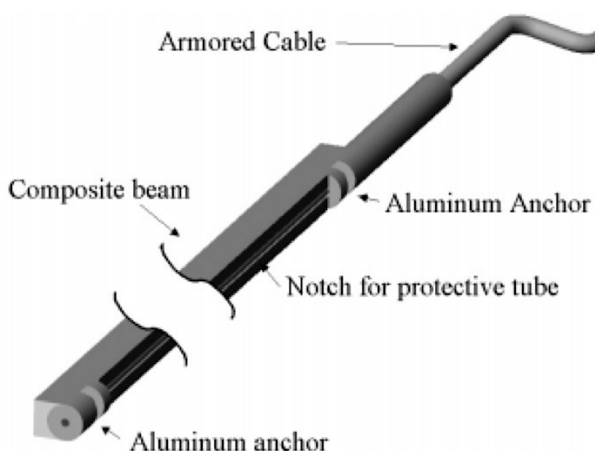
Mojou prácou však bude detekcia rýchlosti automobilov a tento článok sa skôr venuje zaťaženiu. Princíp uloženia optického vlákna bude využitý aj v mojej diplomovej práci. Vláknó sa umiestnilo priečne cez vozovku a tým detekuje kedy prejde vozidlo cez oblasť kde je optické vlákno uložené (obrázok 5.2) [10].

## 5.2 Monitorovanie diaľnice pomocou optických senzorov

Problematikou v tomto článku je riešenie umiestnenia FBG senzorov do vozovky a taktiež či sa dá pomocou týchto FBG senzorov počítat' a klasifikovat' cestná prevádzka. Ďalej sa problematika článku týka dlhovekosti a trvanlivosti týchto senzorov na diaľnici. Do diaľnice boli umiestnené experimentálne FBG senzory. Pri prvom pokuse boli štyri senzory zničené, čo bolo pravdepodobne spôsobené preťažením vozidla, ale zostávajúce senzory boli naďalej funkčné. Počet týchto FBG senzorov bol dostačujúci na potrebné údaje, kde sa taktiež monitorovala aj citlivosť Braggovskej mriežky.

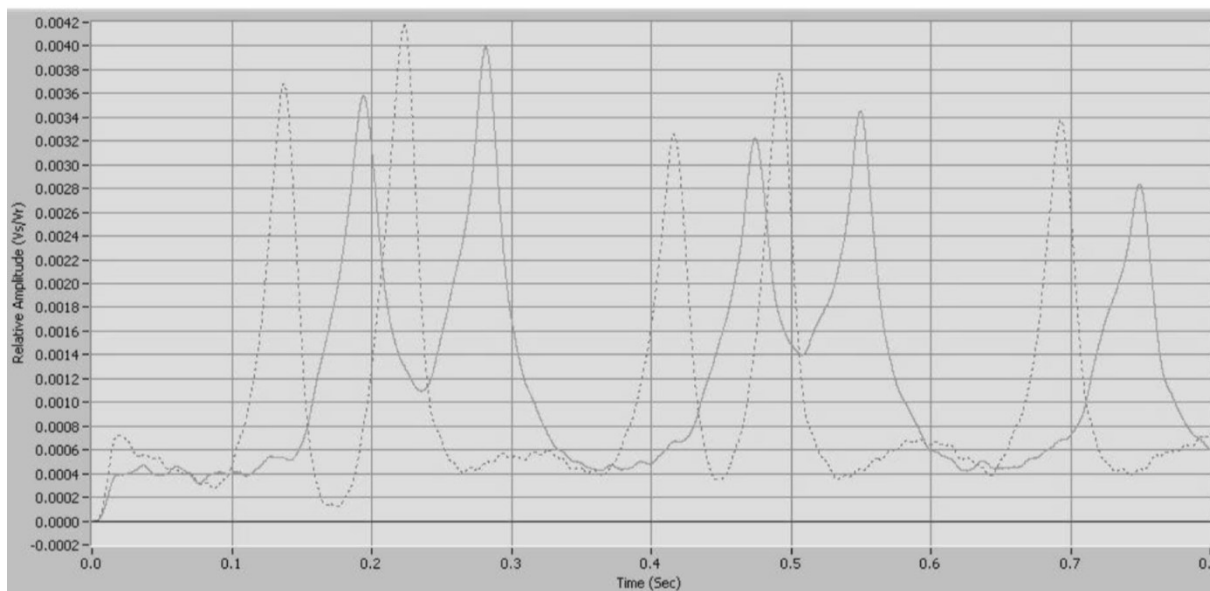
Pri tomto koncepte sa skúmala aj životnosť senzorov. Prišlo sa na to, že fyzická odolnosť senzorov je minimálne dovtedy, pokiaľ nebude potrebná oprava alebo rekonštrukcia vozovky.

Inštalácia senzorov do vozovky bola pomerne jednoduchá. Do vozovky bola narezaná priamka kde bolo umiestnené optické vlákno s Braggovskými mriežkami. Avšak bolo potrebné dávat' pozor aby polomer zakrivenia vlákna nebol viac ako 7,6 cm. [12]



Obrázok 5.3: Konštrukcia FBG senzoru s kompozitným vyžarovaním [12]

Na obrázku 5.3 je zobrazená konštrukcia FBG senzora. Výhodou uzavretia do kompozitného materiálu je, že chráni vlákno a Braggovské mriežky pred extrémnymi deformáciami. Vlákno bolo zapustené 7,6 cm pod povrch vozovky. Pri druhej inštalácii senzorov do vozovky sa pozorovali reakcie viacerých druhov senzorov. [12]

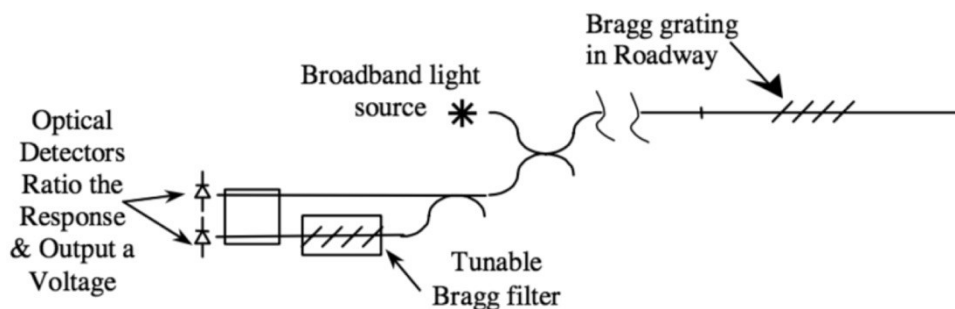


Obrázok 5.4: *FBG senzory LGE) a LGC, odozva na 5-nápravové vozidlo [12]*

Na obrázku 5.4 je zobrazený graf, na ktorom sú hodnoty z FBG senzorov pri prejení 5-nápravového vozidla. Pri tomto meraní boli použité dva druhy FBG senzorov, LGE senzor (long-gage enhanced) a LGC senzor (long-gage composite). LGE je vylepšený senzor o prevádzkovú frekvenciu, oproti senzoru LGC. LGE senzor (bodkovaná čiara v grafe) má tendenciu klesnúť o niečo rýchlejšie na základnú hodnotu ako LGC senzor. To znamená, že je menej náchylný na náhly náraz alebo preťaženie. [12]

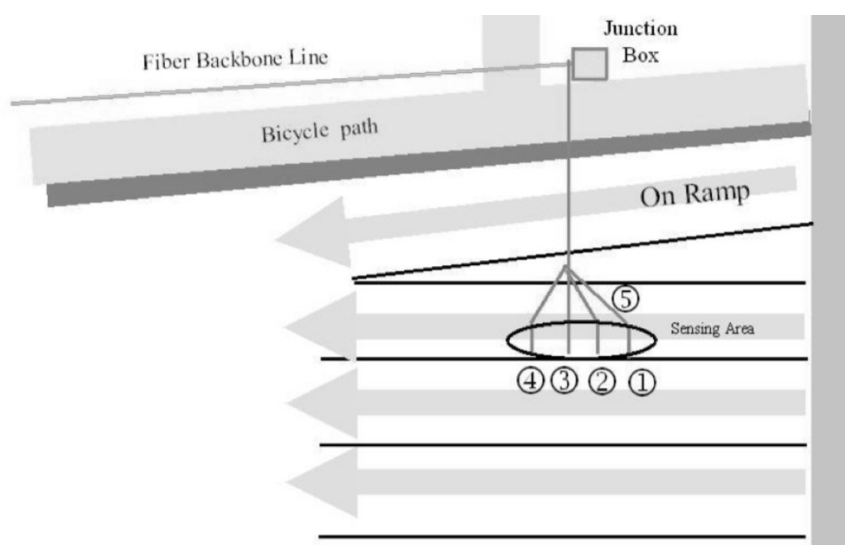
### 5.3 Koncept merania rýchlosti a hmotnosti vozidiel

V tomto koncepte sa vlákno do vozovky inštalovalo obdobne ako v predchádzajúcom koncepte. Okrem zjednodušenej inštalácie sú dopravné senzory FBG kompatibilné s radou senzorov pre pozemné a civilné aplikácie, vrátane snímačov vlhkosti, ľadu, teploty, korózie a vlhkosti. Tieto senzory boli inštalované do vozovky s cieľom zistiť a klasifikovať hustotu dopravy. Tieto senzory boli navrhnuté, tak aby tlak z povrchu vozovky sa preniesol do puzdier FBG senzorov, deformácia senzorov potom zodpovedá hmotnosti a rýchlosti vozidla. Príklad inštalácie senzorov je zobrazený na obrázku 5.5.



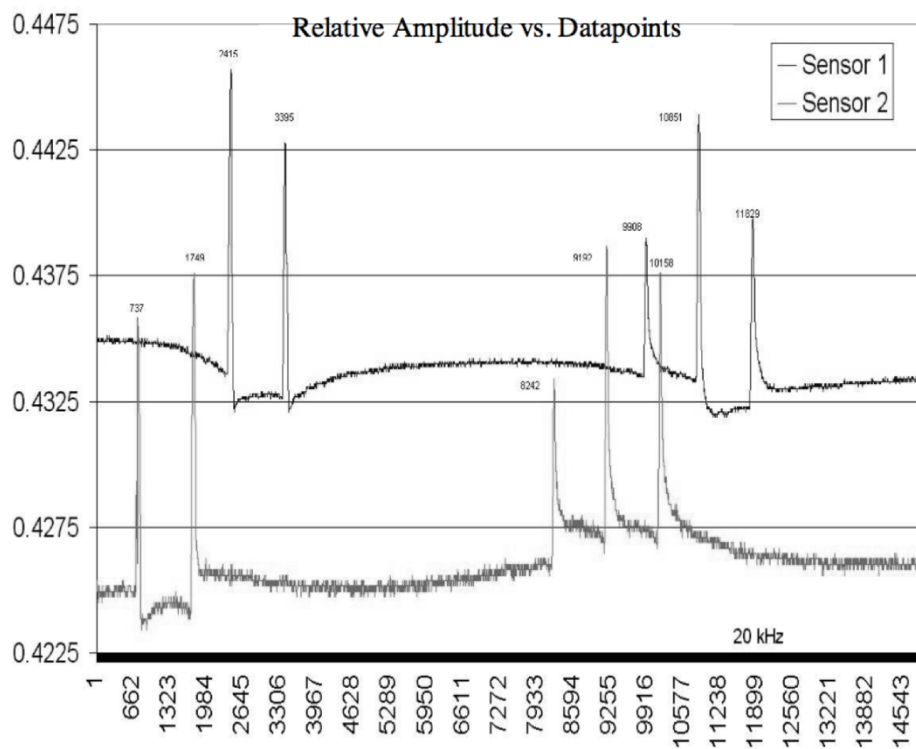
Obrázok 5.5: Schéma FBG senzora pre dopravný systém [13]

Vyhodnocovacia jednotka pre FBG senzor bola vzdialená 500 metrov. Na obrázku 5.6 je zobrazené rozloženie senzorov vo vozovke. Senzor č. 5 monitoruje teplotu vozovky.



Obrázok 5.6: Rozloženie senzorov vo vozovke [13]

Vlákno bolo umiestnené vo vozovke v hĺbke 6,2 cm. Na zaliatie vlákna a dier bol použitý liaty asfalt a zarovnaný zarovno vozovkou. Konečným cieľom dopravného FBG senzora je zamerať sa na citlivosť od bicykla po kamióny. Snímače umiestnené v diaľnici ľahko reagujú na veľké vozidlá, ako je napr. príves traktora, kamiónov a autobusov. [13]

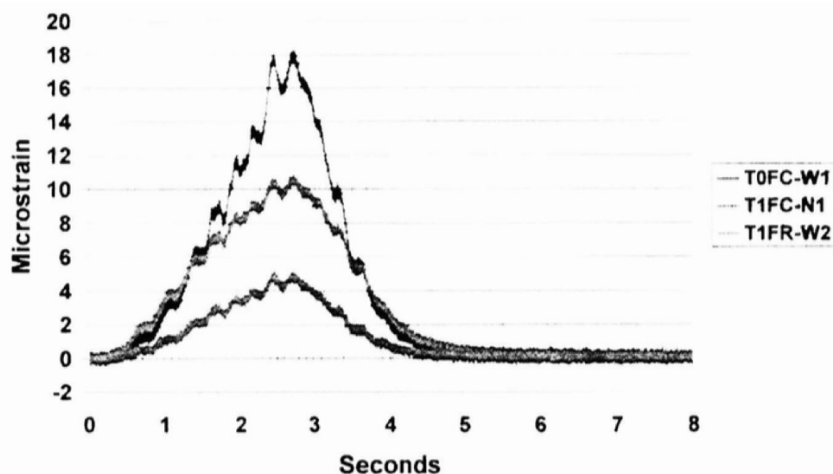


Obrázok 5.7: Graf z dvoch senzorov pri prejazde kamióna s návesom [13]

Na obrázku 5.7 je zobrazená odozva dvoch senzorov na prejde nie kamióna s návesom. V grafe predstavuje jeden jednu nápravu kamióna. Čas pri prejení prvej nápravy v grafe z prvého senzora je pri 737. sekunde a z druhého senzora pri 2515. sekunde. Na základe týchto hodnôt času pri prejení cez senzory a vzdialenosti týchto senzorov vedeli vypočítať rýchlosť kamiónu, ktorá bola 56,8 mph (91,4 km/h). Signál môže byť modulovaný rýchlosťou  $>20$  kHz. [13]

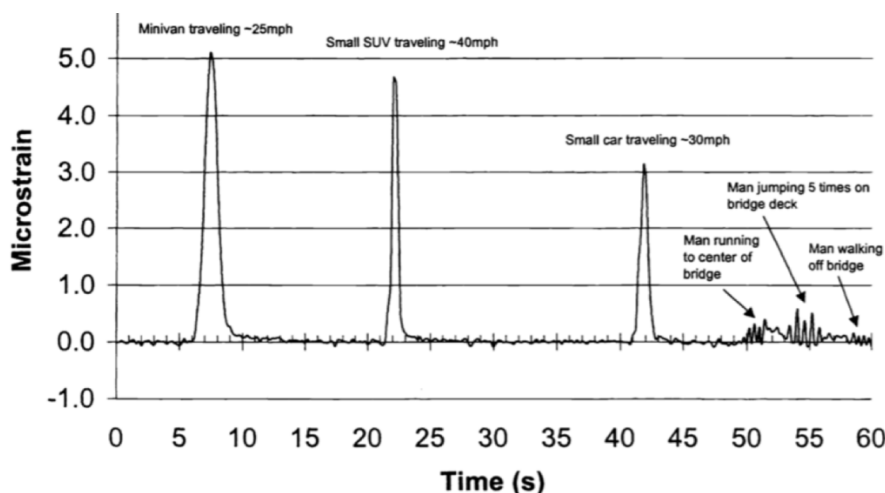
#### 5.4 Monitorovanie mostíku pomocou FBG senzorov

Tento most slúžil spočiatku na prejazd koňov s kočmi. V roku 1998 bolo to mosta umiestených 28 vláknových senzorov. Päť vysokorýchlostných demodulátorov s Braggovskými mriežkami a šírkou pásma 10 kHz, umiestnené pod mostom, sa používali na podporu dynamických testov. Na obrázku 6.8 je zobrazený graf z nameraných výsledkov z troch senzorov. Rýchlosť zaťaženého vozidla pri rýchlosti približne 24 km/h. Rýchlosť zberu dát bola nastavená na približne 2 kHz [15].



Obrázok 5.8: Graf z nameraných hodnôt troch senzorov [15]

Otázkou pri inštalácii senzorov bolo, či je možné zistiť aké vozidlo prechádza cez most. Či ide o veľké alebo malé vozidlo poprípadе bicykel alebo chodca. Obrázok 5.9 znázorňuje výsledky merania premávky vozidiel. Je zrejmé, že celkový tvar vytvorených kriviek sa môže použiť na klasifikáciu vozidla. [15]



Obrázok 5.9: Ukážka klasifikácie vozidiel pri prejazde cez most [15]

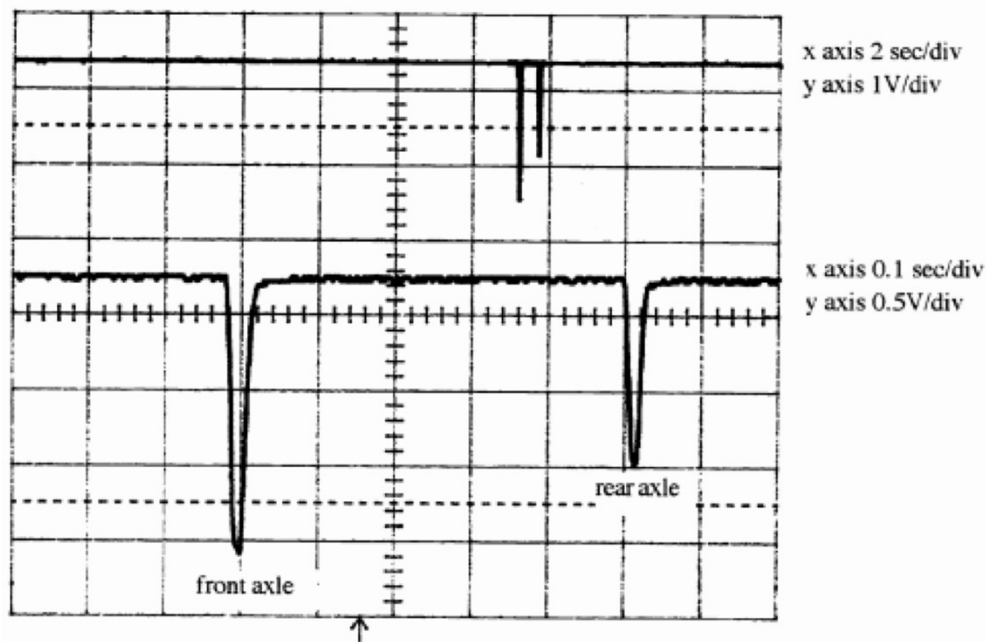
## 5.5 Využitie optických senzorov na sledovanie hustoty dopravy

V tomto článku je opis optického senzora využívaného na sledovanie hustoty dopravy na parkovisku v spoločnosti Virginia Tech. Najťažšou časťou vývoja tohto typu senzora je prenos tlaku prechádzajúceho vozidla na senzor. Takýto senzor musí byť spoľahlivý, nesmie byť náchylný na vandalizmus, nesmie mať rušivé vplyvy pre motoristov a musí byť dobre pripevnený o vozovku. Jeho účinnosť nesmie byť znižovaná environmentálnymi zmenami, ako je teplota, dážď alebo sneh. Taktiež a musí byť schopný odolávať ťažkým vozidlám a voči zimnej údržbe cesty.

Do cesty bola vyrezaná drážka hlboká 12,7 mm a široká 25,4 mm. Do drážky bolo vložené vlákno a zasypané epoxidovou živicom. Snímač dobre reagoval pri rôznych rýchlostiach s opakovateľnými výsledkami. Vzhľadom na obmedzujúce podmienky skúšobného miesta, bola rýchlosť



testovacieho vozidla obmedzená na menej ako 20 MPH (32,18 km/h). Pomer signál šum bol 50 dB, s použitím štandardného detektora a predzosilňovača. Porovnanie odozvy prednej a zadnej nápravy (viď. obrázok 5.10) ukazuje, že takýto senzor sa môže použiť na klasifikáciu hmotnosti v pohybe. Prednej nápravy testovacieho vozidla vážila 784,26 kg, zatiaľ čo zadná náprava vážila 671,32 kg. [16]



Obrázok 5.10: Deformácia senzora pri prejazde vozidlom [16]

Na základe výsledkov z grafu a známeho rázvoru vozidla, vedeli v tomto projekte vypočítať rýchlosť testovacieho vozidla, ktorá bola 16 MPH (25,75 km/h). Ja však na výpočet rýchlosti nepoužijem rázvor vozidla, ale využijem dva optické senzory, ktoré budú umiestnené v určitej vzdialenosti za sebou, čím z každého senzora dostanem dva grafy podobne ako na obrázku 5.7. [16]

## 5.6 Špeciálny vláknový optický senzor na váženie automobilov

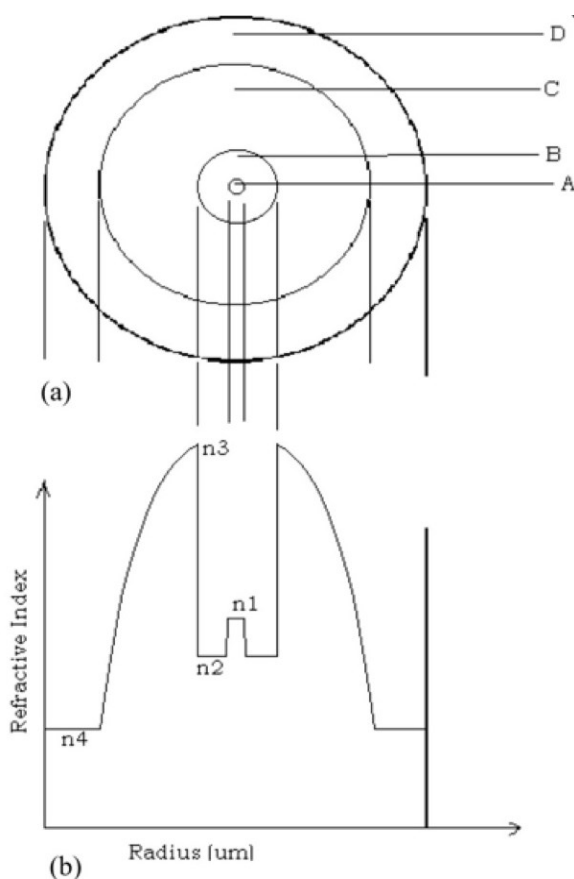
Tento koncept váženia automobilov vznikol v dôsledku toho, že statické váženie automobilov na diaľniciach je časovo náročné, drahé a nebezpečné v hustej premávke.

Koncept váženie v pohybe bol (WIM) bol zavedený pred viac ako päťdesiatimi rokmi. WIM, je proces kedy sa vozidlá vážia bez toho aby vozidlo muselo zastaviť na váhe. Tento systém predstavuje niekoľko výhod oproti statickému váženiu. K ním patrí úspora času, nákladov a bezpečnosť na cestách. V priebehu posledných piatich desaťročí sa vyvinulo množstvo rôznych systémov WIM na váženie diaľkových vozidiel. Avšak tieto systémy WIM môžu poskytnúť nekonzistentné hodnoty kvôli kolísaniu teploty, zmenám rýchlosti vozidiel. Sú tiež relatívne zložité v dizajne a vyžadujú zložité systémy pre získavanie a analýzu údajov. Kvôli výborným vlastnostiam optických vlákien, ako sú napríklad malý priemer, nízka hmotnosť, odolnosť voči elektromagnetickému rušeniu, vysoká citlivosť, sa systém WIM zameriava práve na technológie založené na optických vláknach. Práce tie to systémy využívajú v optických vláknach ohyby, svetelnú polarizáciu a koncepciu Braggovskej mriežky.

Mechanické sily, pôsobiace v rôznych bodoch optického vlákna, ktoré spôsobujú vyviazanie svetla šíriaceho sa pozdĺž vlákňového jadra v dôsledku ohýbania, boli detegované pomocou OTDR.

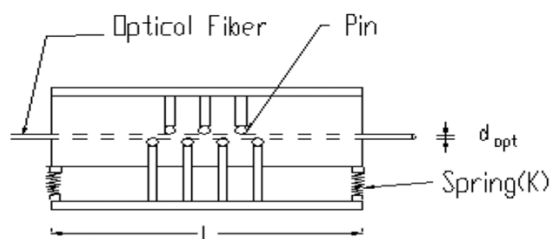
Táto technika je založená na Rayleigho spätnom rozptyle. Vážnym nedostatkom tejto techniky, okrem polarizácie, je to, že dochádza k vyvážovaniu svetla z vlákna a namiesto toho poskytuje odhad jeho intenzity nepriamo z rozdielu medzi dvomi slabými Rayleighovými spätnými rozptylovými signálmi [17].

Špeciálne vyrobené optické vlákno je zobrazené na obrázku 5.11. Toto vlákno je zložené z dvoch jadier (A, C), ktoré sú oddelené navzájom plášťom (B) a následne celé optické vlákno je obalené vonkajšou ochranou (D). [17]



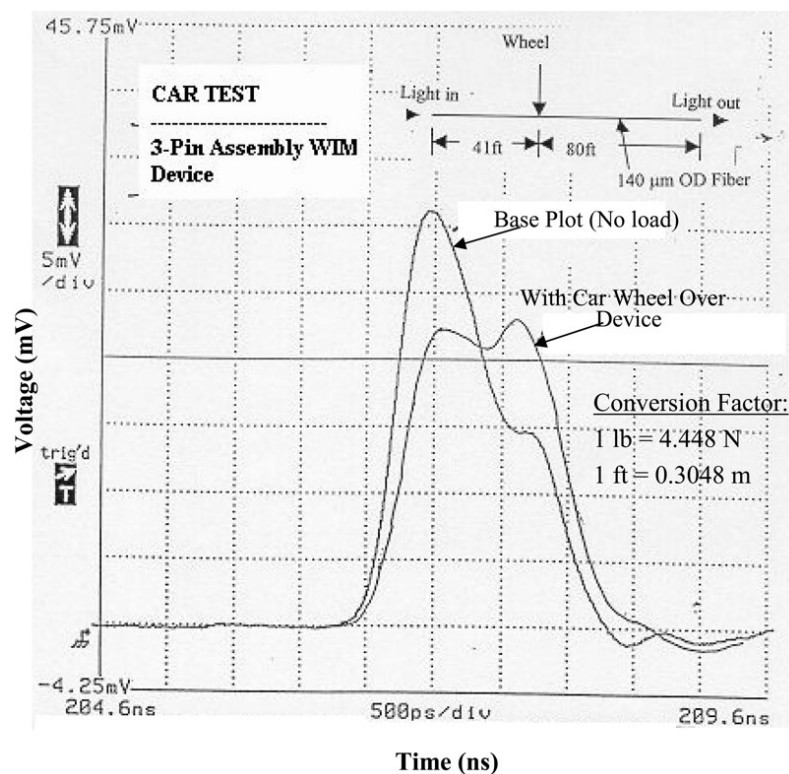
Obrázok 5.11: (a) prierez vlákna, (b) schéma reprezentatívneho profilu indexu lomu [17]

Princíp spočíva v tom, že pri ohybe vlákna sa svetlo vyváža z vnútorného jadra (A) prejde do vonkajšieho jadra (C) a tento signál je prenášaný na koniec optického vlákna. Aby sa vlákno detegovalo prejazd vozidla bolo vyvinuté zariadenie na ohyb vlákna, ktoré je zobrazené na obrázku 5.12. [17]



Obrázok 5.12: Prierez zariadenia, ktoré spôsobí ohyb vlákna pri prejazde vozidla [17]

Následne prešlo vozidlo po tomto zariadení. Výsledok je zobrazený na obrázku 5.13. Pred zaťažením kolesa vozidlom bol jeden výstupný svetelný impulz, ktorý bol aj impulzom vstupného svetla, ktoré prechádzalo vnútorným jadrom (A). Možno pozorovať, že ľavý vrchol sa znížil a v dôsledku zaťaženia kolesa sa objavil pravý vrchol. Pravý vrchol tvorí zlomok svetla, ktoré uniklo z vnútorného jadra vlákna do vonkajšieho jadra vlákna v mieste ohybu. Zníženie intenzity ľavého vrcholu tak udáva mieru veľkosti zaťaženia kolesa. [17]

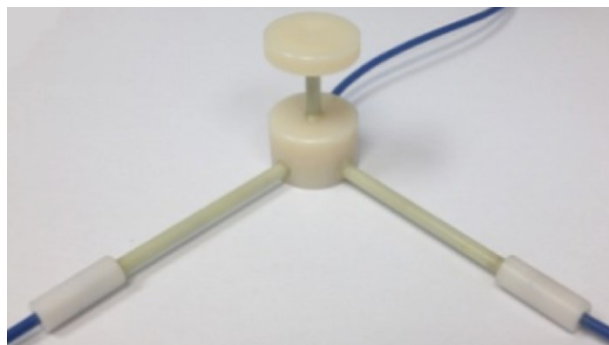


Obrázok 5.13: Graf z analýzy prejazdu vozidlom [17]

## 5.7 Využitie FBG na meranie rýchlosti vozidiel a odhadu rázvoru vozidla

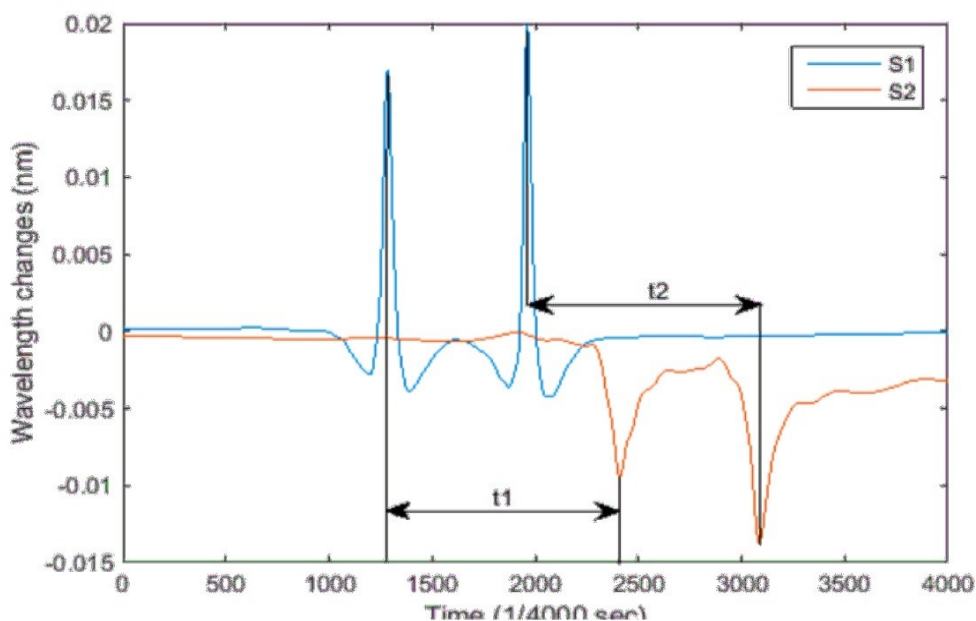
V tejto štúdií sa zavádza trojrozmerný snímač Fiber Bragg Grating (3D GFRP-FBG), ktorý je implementovaný do sklenených optických vlákien a ktorý je určený na odhad rýchlosti a rázvoru vozidiel. Experimentálne výsledky tejto štúdie vykazujú presnosť na >95%.

Pri inštalácii senzorov FBG môže dôjsť ľahko k ich poškodeniu, pretože sú vyrobené zo skleneného materiálu. Snímač FBG teda musí byť zabalený do ochranného puzdra. Polymér zosilnený skleneným vláknom (GFRP) sa stal široko akceptovaným pre použitie v stavebných aplikáciách, poskytuje trvalú a spoľahlivú obalovú alternatívu k oceli. Preto sa materiál GFRP použil na balenie trojrozmerného (3D) snímača FBG na zlepšenie jeho odolnosti. Na obrázku 5.14 je zobrazený dizajn pre 3D GFRP-FBG senzor. Komponent snímača s krátkym meraním má za úlohu zistiť vertikálne namáhanie. Komponent s dlhým meraním sa používa na detekciu pozdĺžnych a priečnych napätí. Pozdĺžny smer je definovaný ako smer pozdĺž dráhy kolesa cesty a priečny smer je definovaný v smere pozdĺž prierezu cesty. [18]



Obrázok 5.14: Dizajn 3D GFRP-FBG senzora [18]

Aby bolo možné odhadnúť rýchlosť vozidla a rázvor, sú potrebné minimálne dva snímače, ktoré sa musia inštalovať do vozovky. Aby sa minimalizovala systematická chyba inštalácie, mala by byť vzdialenosť medzi senzormi veľká, aby sa dosiahla maximálna presnosť odhadu rýchlosti vozidla. Sensory sú na vozovke umiestnené vo vzdialenosti 4,88 m v smere jazdy vozidiel a umiestnené čo najviac k dráhe kolesa. Na obrázku 5.15 je jasne uvedené, že každá náprava vozidla vyvolá špičku v grafe signálu FBG senzorov. Preto môže byť na identifikáciu výskytu prechádzajúcej nápravy použitý výskyt individuálneho peaku v ľubovoľných komponentoch 3D snímača GFRP-FBG a môže sa uviesť počet náprav prechádzajúceho vozidla.[18]



Obrázok 5.15: Odozva senzora pri prejazde dvojnápravového vozidla [18]

Na odvodenie rázvoru vozidla je veľmi dôležité presne odhadnúť rýchlosť vozidla. Vzhľadom na to, že vzdialenosť medzi obidvoma snímačmi v sieti senzorov, 3D-1 a 3D-2 je známym parametrom z návrhu senzorov, ktorá bola v tejto štúdii 4,88 m a čas je zaznamenaný spolu so signálom senzora, môže byť rýchlosť jazdy vozidla odhadnutá ako:

$$v = \frac{D}{t}, \quad (5.1)$$

kde  $D$  je vzdialenosť medzi senzormi a  $t$  je čas medzi dvoma špičkami dvoch senzorov pre tú istú nápravu. Keďže pre vozidlo sú minimálne dve nápravy, časové intervaly sa dajú dvakrát merať pomocou prvých špičiek, ak sú dva senzory v sieti ( $t_1$ ) a druhé špičky dvoch snímačov ( $t_2$ ). Presnosť výpočtu rýchlosti sa teda dá zlepšiť tak, že sa priemer dvoch špičiek senzorov prídavných hodnôt zmení:

$$v = \frac{\left(\frac{D}{t_1} + \frac{D}{t_2}\right)}{2}. \quad (5.2)$$

Rázvor vozidla sa dá potom vypočítať ako:

$$WB = vt, \quad (5.3)$$

$t$  je časový interval medzi dvoma detegovanými špičkami senzora.

Pri skúšaní navrhovaného systému sa použil 5-nápravová súprava s celkovou hrubou hmotnosťou 36,29 ton. Vozidlo sa pohybovalo rôznymi rýchlosťami: 40,2 km/h, 56,3 km/h a 72,4 km/h. Vypočítané vzdialenosti rázvor náprav boli 5,19 m, 1,38 m, 10,29 m a 1,27 m. Výsledky merania rýchlosti zo senzorov boli porovnané s výsledkami z radarovej pištole, aby sa overila presnosť merania systému. Po porovnaní výsledkov sa došlo k záveru že presnosť merania bola na 95%. [18]

## 5.8 Analýza optických senzorov v doprave

Technológia FOTS (Fiber-Optic Transmission System) bola vyvinutá pomocou koncepcie známej ako teória optovláknových microbendov. Napriek tomu, že na meranie tlaku alebo napätia sa používajú mnohé typy optických snímačov, najúspornejšie sú tie, ktoré sú založené na princípoch microbendu (senzor microbend bol jedným z prvých optických senzorov). Ak sú tieto snímače správne navrhnuté, môžu byť skonštruované s pomerne lacnými komponentmi. Napríklad ako svetelný zdroj môže byť použitá LED dióda, vlákno potrebuje len malú alebo žiadnu prípravu pred umiestnením do snímacej oblasti. Iné typy optických senzorov vyžadujú nákladné lasery ako svetelný zdroj a veľmi sofistikované elektrické zariadenie na interpretáciu signálu. □

FOTS je flexibilný senzor so vstupnými a výstupnými vedeniami, ktoré produkujú ostré, čisté, neprerušované svetelné signály s merateľnou intenzitou do a zo snímača. Sensory umiestnené v chodníkoch sú zvyčajne dlhé asi 6 metrov. Prierez senzora má hrúbku približne 1,9 mm o šírku 7,65 mm. Sensory sú nainštalované v poli do drážok tak, že sa spájajú s povrchom chodníka, čím zabráňujú prenikaniu vody a poškodeniu senzora. Keď vozidlá prechádzajú cez senzory, zaťaženie z pneumatík vozidla deformuje senzory a spôsobuje pokles intenzity svetla.

Keď sa vlákno ohýba s malými polomerami, svetlo z jadra vlákna sa vyviaže do ochranných vyrovnávacích vrstiev vlákna, čo spôsobuje zníženie intenzity svetla. Zmena intenzity žiarenia zo zdroja sa monitoruje pomocou systémov na zber údajov, aby sa dosiahli odchýlky od pôvodnej intenzity. Sensory boli inštalované do drážky chodníka, ktorej rozmery boli 3 mm na hĺbku a 25 mm na šírku a zapuzdrené do elastického materiálu.

Keď sú FOTS senzory umiestnené v úzkych vertikálnych drážkach, straty intenzity signálu alebo svetla sú dôsledkom toho, že drážka sa zúži, keď vozidlo zaťaží vozovku (chodník). Pridružené pohyby drážky sú dostatočné na to, aby spôsobili zníženie intenzity svetla.

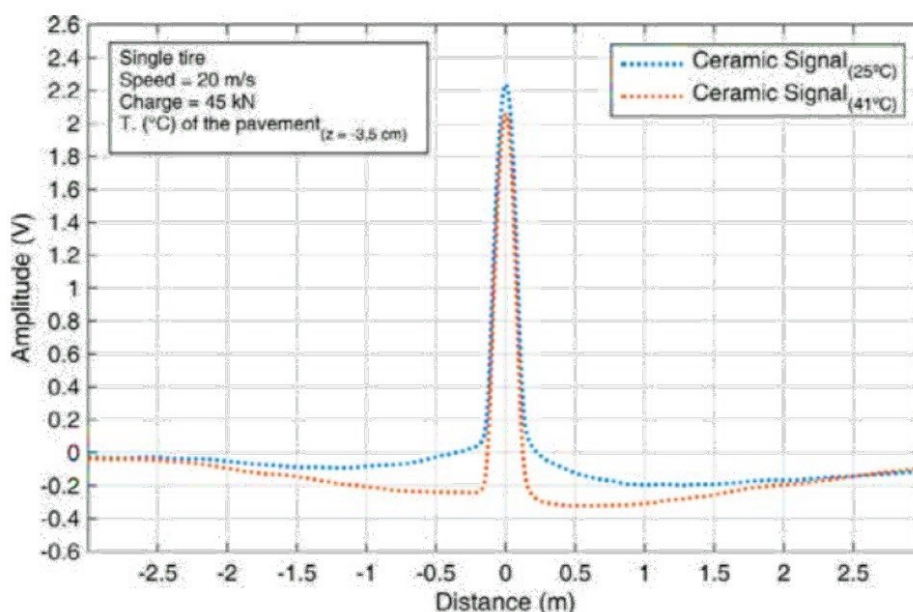
Vertikálne inštalované snímače by mali byť umiestnené v drážke približne 3,2 mm (presná hĺbka drážky na optimalizáciu citlivosti nebola určená). Avšak keď sa hĺbka zvyšuje, drážka sa teoreticky

pohybuje viac a spôsobí, že sa z microbendových senzorov preniesie ďalšie svetlo. Hĺbka približne 19 mm, by bola prijateľná.

Testovanie WIM by sa malo vykonávať v širokom rozsahu možných zaťažení, pričom rýchlosti vozidla sa menili, aby sa ukázal vzťah medzi reakciou snímača a rýchlosťou vozidla. [19]

## 5.9 Správanie piezoelektrických senzorov, vplyv teploty na meranie

Tento článok sa zameriava na modelovanie elektrického správania snímača WIM, aby sa dalo lepšie pochopiť mechanické a elektrické vlastnosti piezoelektrických snímačov. Model sa uvažuje vo frekvenčnej oblasti, pričom sa predpokladá akékoľvek sínusové vyžarovanie s konštantnou frekvenciou alebo akýmkoľvek iným typom. [20]



Obrázok 5.16: Reálna piezoelektrická keramická odozva senzora [20]

Obrázok 5.16 zobrazuje dva signály z rovnakého keramického snímača inštalovaného vo vozovke. Oba signály sú výsledkom prechodu jedného kolesa. Rýchlosť je konštantná a odpovedá rýchlosti 20 m/s. Modrý bodkovaný priebeh zodpovedá signálu získanému, keď teplota vozovky bola 25 °C, červený bodkovaný priebeh zodpovedá signálu získanému, keď teplota vozovky bola 41 °C. Keramický snímač je vysoko citlivý na zmeny teploty, tento rozdiel o šesťnásť stupňov postačuje na zmenu ich elektrickej odozvy. Označuje, že pre vysokú presnosť treba brať do úvahy korekčný faktor týkajúci sa teploty.

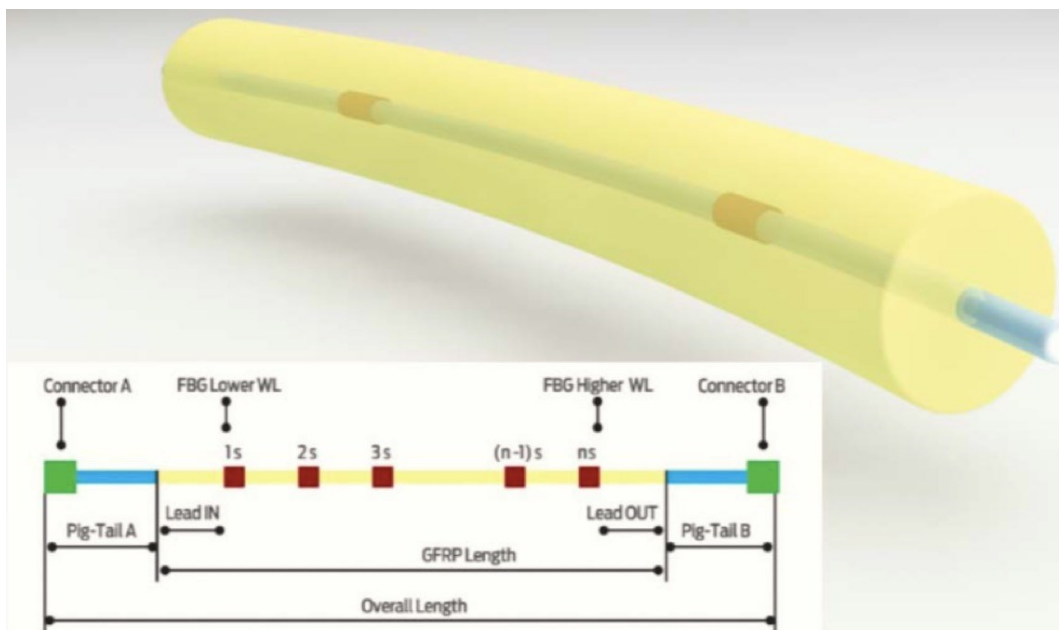
Oblasť v blízkosti stredového vrcholu signálu opisuje, čo sa deje v okamihu, keď koleso prechádza priamo cez snímač. Vzďialenosť medzi momentom, keď sa kolesa dotýkajú, až do okamihu, keď koleso vozidla odchádza zo snímača, má približne rovnakú veľkosť stopy. Veľkosť stredového vychýľovania a tvar signálu sa mení, v závislosti na teplote. Priehyb vozovky má priamy vplyv na odozvu senzora. Snímač reaguje na zaťaženie ešte pred tým, ako koleso prešlo priamo po senzore. Táto citlivosť v dôsledku deformácie sa deje na šiestich metroch predtým a po priamom prejazde po senzore. [20]

## 5.10 Optovláknový senzor z FBG uložený v asfalte

Hlavným cieľom tejto štúdie je ukázať výsledky FBG pre počiatočný stavebný proces. Senzory sa implementovali v troch vrstvách asfaltu - inštalácia FBG v prefabrikovaných asfaltových vzorkách v základnej vrstve, inštalácia FBG na povrchu predtým skonštruovanej asfaltovej vrstvy. Obidva inovatívne prístupy umožňujú realizáciu FBG bez toho, aby sa celá vrstva rozrezala na dve časti. Získané výsledky preukázali mieru prežitia 100% pre FBG. [21]

Veľa výskumov sa sústredilo na vlastnosti asfaltových zmesí, ktoré vykazujú jedinečné fyzikálne vlastnosti. Asfaltový materiál sa často považuje za jednoduché výpočty na to, aby sa správal lineárne vysokoelasticky. Jeho mechanická odozva je teda kontinuálna funkcia času a teploty. Vzhľadom na tuhosť materiálu je jeho správanie pri nižších teplotách ekvivalentné vyššej deformačnej rýchlosti, ako je deformácia na vozovke spôsobená pohybom. V prípade vysokej tuhosti by mala byť priľnavosť na asfalte ideálne meraná priamo s najvyššou presnosťou. Nástroje, ktoré sú schopné vykonať takéto merania, nie sú všeobecne dostupné. V skutočnosti, vyššia teplota alebo nižšia rýchlosť deformácie, je ako napätie spôsobené poklesom základov, vedie k mimoriadne nízkemu pružnosti asfaltu. Navyše sa často predpokladá, že pevné nástroje, ako napríklad tenzometre elektrických fólií, majú zanedbateľnú tuhosť. V takýchto prípadoch sa pnutie prenášané z asfaltu na vstavaný snímač drasticky znižuje, čím sa znižuje citlivosť snímača. [21]

FBG sú pomerne krehké a pri nakladaní sa môžu ľahko zlomiť, preto je potreba vhodnej ochrany týchto snímačov. Pre vhodnú ochranu, ktorá zaručuje presnosť merania deformácií a teploty, sú komerčne dostupné organické modulované keramicky pokovované mriežky (DTG®), zabudované do okrúhleho profilu vystuženého skleneným vláknom (GFRP). Vonkajší priemer 1 mm a chránený prídavným polyetylénom (HDPE) s vonkajším priemerom 0,5 mm (viď obrázok 5.17). Tieto DTG môžu merať veľmi vysoké hladiny deformácie ( $> 10\,000\ \mu\text{m/m}$ ) a mali by vykazovať vynikajúcu dlhodobú stabilitu pri mechanických deštruktívnych podmienkach. Mriežky DTG® sa vyrábajú počas procesu ťahania samotného vlákna pred aplikáciou primárnej ochrany. Vzhľadom na to, že ide o nákladovo efektívny výrobný proces pre vysokokvalitné Braggovské mriežky, ponúka jedinečné vlastnosti, ako je extrémne vysoká pevnosť pri pretrhnutí, prevádzkový teplotný rozsah až  $200\ ^\circ\text{C}$  (pre ORMOCER®), konfigurácie polí a jednotného pokrytia, ktoré sú veľmi dôležité pre aplikáciu týchto vlákien v asfalte. [21]



Obrázok 5.17: Konfigurácia FBG s mriežkami Draw Tower (DTG®) [21]

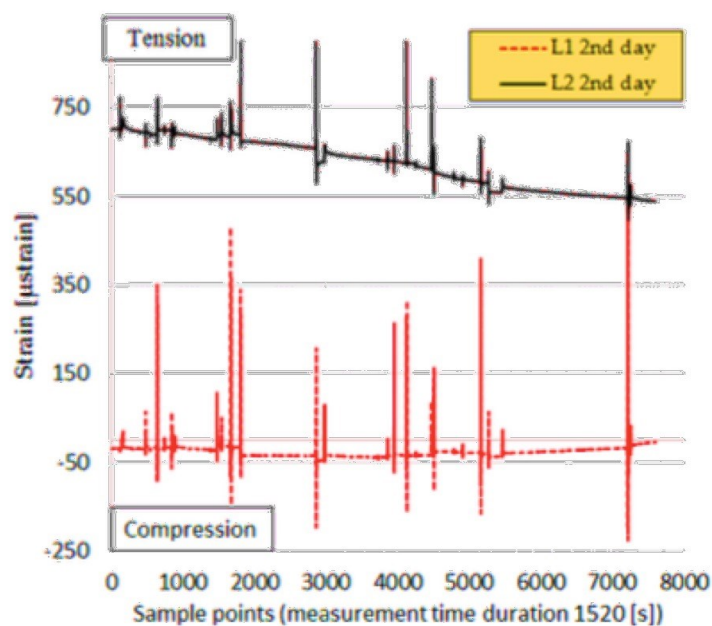
Ochrana senzorov je pretrvávajúcou náročnou otázkou, najmä pokiaľ ide o ochranu snímačov FBG inštalovaných pri veľmi vysokých teplotách asfaltu a pri ťažkých zaťaženiach. Niekoľko ochranných konfigurácií vrátane vlákňového polyméru (FRP), oceľových rúrok a povlakov z epoxidových živíc vystužených uhlíkovými sú schopné poskytnúť primeranú ochranu. Aby sa však zabezpečilo neporušenie FBG počas inštalácie v základnej asfaltovej vrstve, sa vlákno s FBG vložilo do asfaltových vzoriek (viď obrázok 5.18). [21]



Obrázok 5.18: Vzorky s drážkami na prípravu vloženia FBG [21]

Rozmery dosiek boli 500×50×15 mm, do ktorých boli vyrezané drážky s hĺbkou 2 mm, po uložení vlákna boli pokryté tenkou vrstvou. Dosky boli následne zlepené tmelom a uložené do vozovky drážkou smerom nadol. Na tieto dosky sa naniesol asfaltový koberec po celej šírke cesty.





Obrázok 5.19: Hodnoty senzorov počas konštrukcie asfaltového koberca CyPaTs – 2.deň [21]

Obrázok 5.19 znázorňuje reakcie senzorov. Je možné pozorovať rozdiel v odozve snímačov v pozdĺžnom a priečnom smere. Špičky napätia sú vyššie v pozdĺžnom smere (L) než v priečnom smere (T). [21]

## 5.11 OptiWIM®

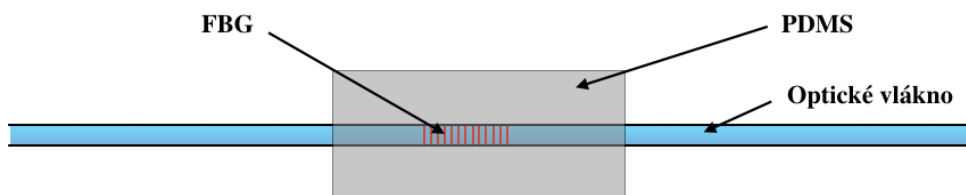
OptiWIM® rieši problémy súčasných technológií váženia v pohybe, ktoré sú na ich fyzických hraniciach. OptiWIM® predstavuje novú generáciu WIM, ktorá plne umožňuje rýchly rozvoj priameho presadzovania a otvára novú kategóriu požadovanej mýtnej aplikácie - Toll-per-tonne. Tento systém pozostáva z jednoduchkej konštrukcie, ktorá má tzv. U-bed, ktorá sa umiestni do povrchu vozovky. Táto konštrukcia má vydržať 10 rokov bez údržby. Po uplynutí 10 rokov bude údržba pozostávať len zo zmeny vnútorných priestorov bez potreby iného zásahu do povrchu vozovky. Snímač pracuje výlučne na optických princípoch bez elektronických komponentov. Elektronika sa nachádza v riadiacej jednotke, nie v senzore. Toto inovatívne riešenie umožňuje získať neprimerane veľké množstvo údajov zo snímača počas každého merania v porovnaní s bežnou technológiou. OptiWIM® je úplne pasívny s maximálnou rádiovou frekvenciou, t. J. Odolnosťou voči magnetickému poľu. Snímač je jedinečný s kompenzáciou zmeny teploty bez skreslenia, ktorá umožňuje presné hodnotenie váhy bez ohľadu na aktuálne poveternostné podmienky. Systém dokáže určiť koľko náprav má vozidlo a taktiež či má vozidlo podhustené pneumatiky a to aj v prípade, že ide o dvoj montáž jednotlivých kolies na sebe. [22]



Obrázok 5.20: Zariadenie pre meranie systému OptiWIM® [22]

## 6 Návrh FBG senzorov pre meranie rýchlosti

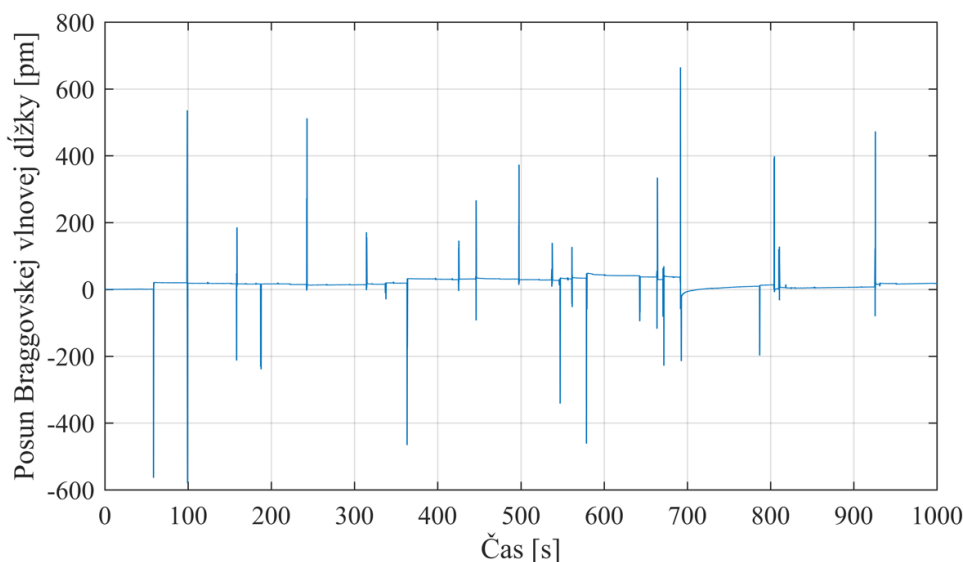
Pred samotným vytvorením pásu z FBG senzorov, ktorý bude pokrývať celú šírku vozovky, bol do vozovky umiestnený jeden senzor na analýzu prejazdov. Vláknó s Braggovskou mriežkou bolo zaliaté do PDMS. Po vytvrdnutí bola do asfaltu bola vyrezaná drážka do ktorej sa vložil FBG senzor a následne bol zaliaty studenou zalievacou zľúčeninou Biolast 2K. Schéma FBG senzoru je zobrazená na obrázku 6.1.



Obrázok 6.1: Schéma FBG senzoru

### 6.1 Analýza PDMS senzora vo vozovke

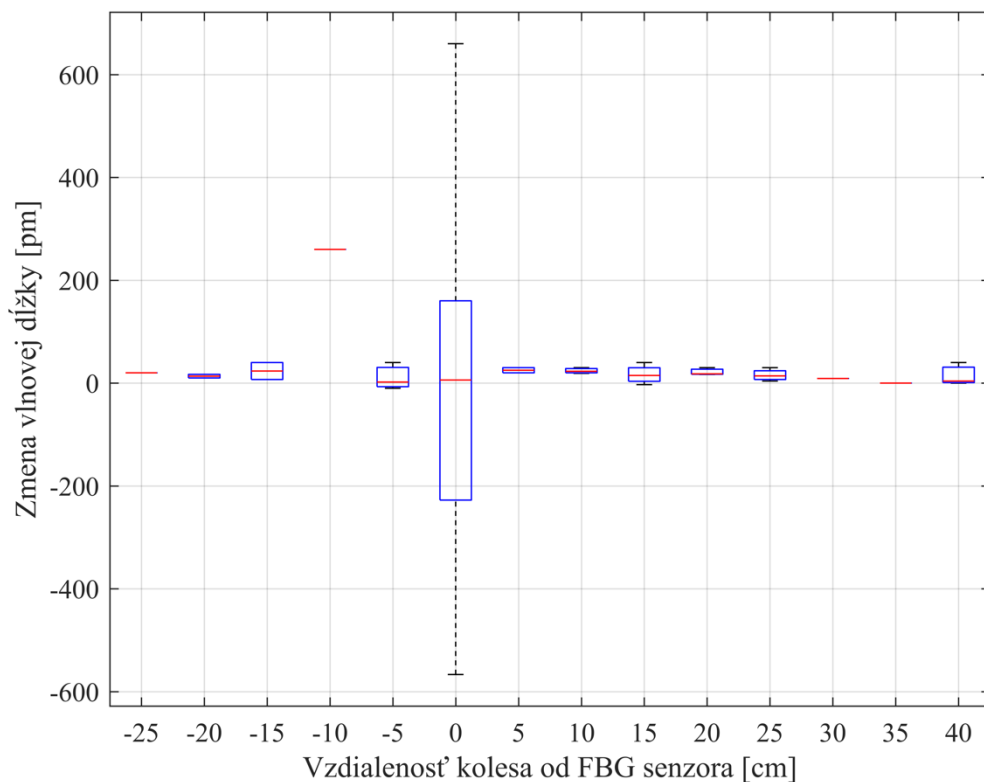
Na základe podrobnej analýzy chovania tohto senzora pri prejazde vozidiel bol vytvorený retiazok pozostávajúci z viacerých FBG. Z hodnôt tohto senzora som určoval parametre pre vytvorenie celého pásu z viacerých senzorov, ktorý bude zaliaty do vozovky. Mojou úlohou bolo potrebné zistiť, v akej vzdialenosti od seba treba umiestniť jednotlivé Braggovské mriežky aby bola dostatočne pokrytá celá šírka vozovky, teda bol detekovateľný každý prejazd vozidla a následne vypočítaná jeho rýchlosť.



Obrázok 6.2: Dáta zo senzora implementovaného vo vozovke

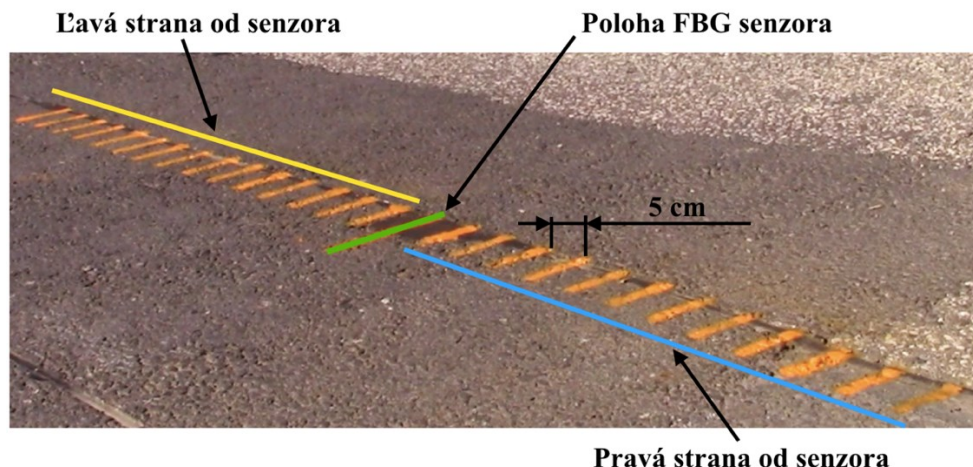
Priebeh merania a jednotlivé prejazdy vozidiel sú zobrazené na obrázku 6.2. Na základe týchto výsledkov a kamery (obrázok 6.4), ktorá snímala jednotlivé prejazdy vozidiel, som analyzoval v akej vzdialenosti prešlo koleso vozidla od senzora a následne aký bol posun vlnovej dĺžky pri prejazde

jednotlivých vozidiel. Na obrázku 6.3 je zobrazený graf z ktorého je možné vidieť v akej vzdialenosti od umiestnenia senzora prechádzali vozidlá.



Obrázok 6.3: Prejazd vozidiel v rôznych vzdialenostiach od FBG

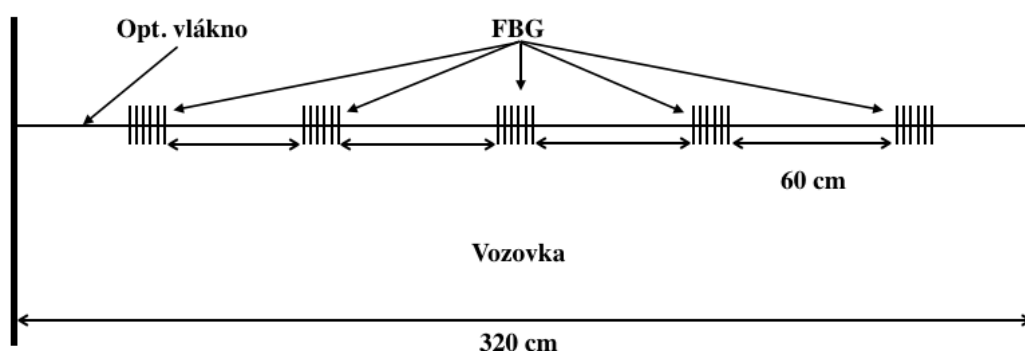
Zmenu vlnovej dĺžky som zaznamenával každých 5 cm od FBG senzora a to od 25 cm na ľavú stranu od senzora, do 40 cm na pravú stranu od senzora (obrázok 6.4). Najviac prejazdov od FBG senzora je zaznamenaných vo vzdialenosti 0 cm, čo znamená že auto prešlo priamo po senzore. Pri tejto vzdialenosti bol rozsah zmeny vlnovej dĺžky od -566.7 pm do 660 pm. Z grafu je možné vidieť, že posun vlnovej dĺžky je pri ostatných vzdialenostiach od senzora do 50 pm. Tento posun vlnovej však dostatočne stačí na zaznamenanie prechádzaného vozidla. Pri vzdialenosti nad 30 cm už nebol prejazd vozidla dostatočne zaznamenaný. Z toho vyplýva, že senzor reaguje najlepšie do vzdialenosti 30 cm.



Obrázok 6.4: Rozloženie FBG senzora pri analýze odozvy na prejazd vozidla

## 6.2 Návrh sensorového pásu z Braggovských mriežok

Jednou z dôležitých úloh tohto merania bolo určenie vzdialenosti  $L$  medzi jednotlivými Braggovskými mriežkami, tak aby aspoň jedna z nich dokázala zaznamenať prejazd auta. Z hodnôt už zo zaliateho senzora do asfaltu som teda zistil že FBG reaguje najlepšie do vzdialenosti 30 cm a preto som zvolil vzdialenosť medzi jednotlivými Braggovskými mriežkami bude 60 cm. Auto strednej triedy má šírku kolesa 20,5 cm a pri tejto šírke kolesa mi bude odstup jednotlivých Braggovských mriežok stačiť. Počet mriežok bude závislý na šírke vozovky. Celý pás senzorov s jednotlivými senzormi bude implementovaný do vozovky. Pre pokrytie celej šírky vozovky som zvolil celkovú dĺžku retiazku zo senzorov 320 cm. Na pokrytie celej šírky som teda vypočítal 5 senzorov s Braggovskými mriežkami pre tento rozmer.



Obrázok 6.5: Návrh rozloženia senzorov vo vozovke

Spojením niekoľkých Braggovských mriežok pre meranie veličín sa nazýva senzorická vetva. Následne je možné všetky Braggovské mriežky v senzorickej vetve možné vyhodnocovať súčasne jednou vyhodnocovací jednotkou. Pri návrhu senzorickej vetvy je potrebné zohľadniť niekoľko parametrov.

Ako prvé je potreba definovať pracovnú spektrálnu oblasť, ktorá je definovaná centrálnou vlnovou dĺžkou a šírkou spektra vyžarovaného svetla. Šírka spektra môže byť zadaná podľa požiadavky ľavej a pravej hranici strany spektra ( $\lambda_{LED\_MIN}$  a  $\lambda_{LED\_MAX}$ ). [1] Ďalej treba dbať na parametre pri

výrobe Braggovských mriežok a to výrobná tolerancia Braggovskej vlnovej dĺžky ( $T_{FBG}$ ), šírka odrazeného spektra (FWHM) a výrobná tolerancia šírky odrazeného spektra (TFWHM).

Keďže bude vlákno s Braggovskými mriežkami implementované do vozovky je treba zohľadniť aj zmenu teploty vozovky ( $\Delta\lambda_{BT+}$  a  $\Delta\lambda_{BT-}$ ), tlak pôsobiaci na jednotlivé Braggovské mriežky ( $\Delta\lambda_{B\_MRn}$  a  $\Delta\lambda_{B\_MRp}$ ), a tiež posun vlnovej dĺžky spôsobenú tuhnutím PDMS materiálu ( $\Delta\lambda_{Z+}$  a  $\Delta\lambda_{Z-}$ ), do ktorého budú Braggovské mriežky zapuzdrené.

Teplotné pole značne ovplyvňuje parametre Braggovskej mriežky. Pri zmene teploty dochádza k posunu Braggovskej vlnovej dĺžky. Je to dôsledok teplotnej rozťažnosti materiálu, zmien efektívneho indexu lomu a následne zmeny mriežkovej periódy. Teplotná citlivosť taveného oxidu kremičitého Braggovskej mriežky je v podstate určená indexom lomu a teplotným koeficientom materiálu bez zohľadnenia vonkajších faktorov. V súčasnosti je teplotná citlivosť ( $k_T$ ) holej Braggovskej mriežky všeobecne udávaná 10 pm/°C. [23]

Na základe už implementovaného senzora vo vozovke sa pri výrobe zistilo, že stuhnutím materiálu PDMS môže dôjsť k posunu vlnovej dĺžky Braggovskej mriežky až o 4,2 krát a tým sa dostávam k vzťahu:

$$k_{PDMS\_FBG} = k_T 4,2 = 42 \text{ pm}. \quad (6.1)$$

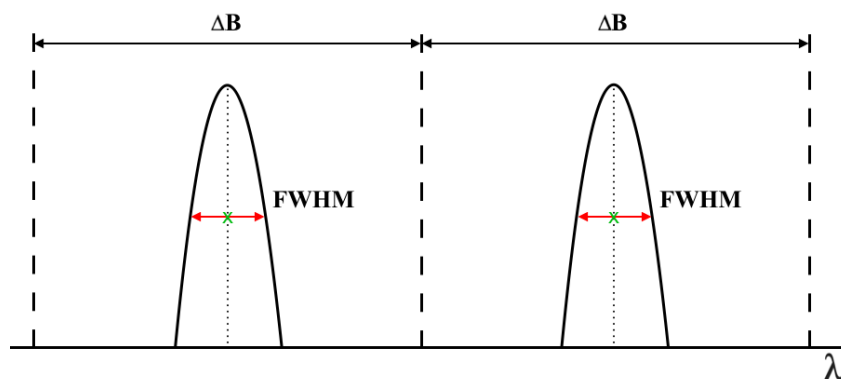
Vonkajšia teplota vplývajúca na zmenu Braggovskej vlnovej dĺžky sa môže pohybovať od -40 °C až do 60 °C. V lete sa vozovka od Slnka dost' výrazne nahrieva a v zime zem zas naopak ochladzuje. Vozovka sa zahrieva alebo ochladzuje po celej šírke rovnako a posun vlnovej dĺžky bude teda približne rovnaký na každej Braggovskej mriežke. Rozdiel teplôt  $\Delta T$  medzi jednotlivými senzormi bude teda veľmi malý. Ja som si zvolil hodnotu  $\Delta\lambda_{BT+}$  a  $\Delta\lambda_{BT-}$  0,84 nm, čo predstavuje rozdiel teploty  $\Delta T$  o 20 °C.

Dôležitým zistením pri zapuzdrovaní mriežky do PDMS je, že tuhnutím tohto materiálu, sa Braggovská vlnová dĺžka  $\Delta\lambda_Z$  môže zmeniť od 0,5 nm do 2,2 nm.

Na posun Braggovskej vlnovej dĺžky vplýva aj tlak vyvinutý od prechádzajúceho auta. Z grafu na obrázku 6.1 je vidieť, že maximálna výchylka pri prejazde autom je 0,66 nm (pri rýchlosti 10,3 km/h) priamo v bode kde bol senzor uložený. Táto hodnota bola nameraná pri prejazde autom Škoda Octavia II, ktorého hmotnosť je približne 1200 kg. Na ulici kde bude vlákno so senzormi implementované do vozovky je zákaz vjazdu nákladným vozidlám a preto som zvolil, že môže dôjsť k maximálnej odchýlke  $\Delta\lambda_{MRN}$  1.5 nm v prípade ak by po tejto ulici prešlo predsa ťažšie vozidlo. Aby som mohol ešte správne vyhodnotiť susedné vrcholy, nesmie byť minimálny pokles prekrývajúcimi vrcholmi viac ako 50%. Veľkosť minimálneho ochranného pásma sa vypočíta zo vzťahu:

$$GB_{min} = k_{GB}(FWHM + T_{FWHM}), \quad (6.2)$$

Z dizertačnej práce zaoberajúcou sa návrhom senzorickej vetvy s FBG bolo zistené, že pre rovnaké FWHM a aproximačné odrazené spektrum Gaussovskou krivkou nadobúda koeficient pre 3 dB rozlišovacie kritérium hodnotu  $k_{GB}$  1,41. [24]



Obrázok 6.6: Rozloženie parametrov pri návrhu vlnových dĺžok senzorov

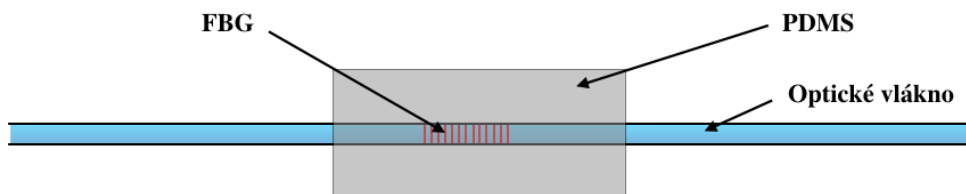
Po sčítaní všetkých maximálnych zmien vlnových dĺžok, popísaných vyššie, sa dostávam k maximálnemu možnému posunu Braggovskej vlnovej dĺžky ku ktorej môže dôjsť. Táto hodnota je zobrazená na obrázku 6.6 ako  $\Delta B$  a hodnota je 6,1 nm. Rozsah vlnových dĺžok musel byť v šírke spektra od zdroja žiarenia a to od 1525,5 nm do 1556 nm. Pri výbere Braggovských vlnových dĺžok som bol obmedzený z dostupnými Braggovskými mriežkami. Hodnoty použitých Braggovských mriežok sa približujú tým navrhnutým, avšak minimálny rozdiel centrálnych vlnových dĺžok musí byť dodržaný. Hodnoty je možné vidieť v tabuľke 6.1.

Tabuľka 6.1: Navrhnuté a použité vlnové dĺžky jednotlivých Braggovských mriežok

Navrhnutá $\lambda_B$ [nm]	Použitá $\lambda_B$ [nm]
1529,400	1529,843
1535,500	1540,031
1541,600	1547,613
1547,700	1554,371
1553,800	1560,399

### 6.3 Výroba FBG senzorov z PDMS

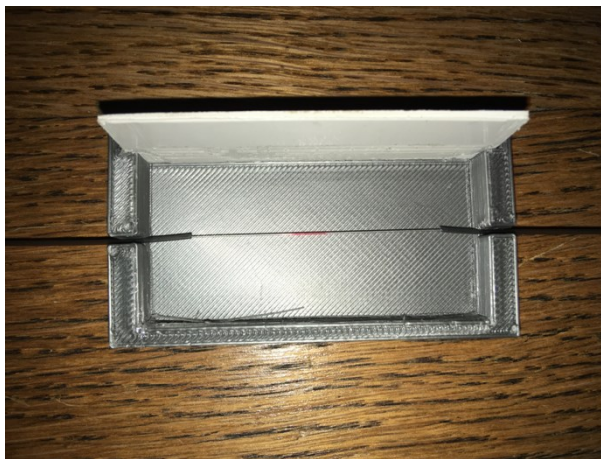
Pri návrhu senzorov založených na Braggovských mriežkach bolo nutné vybrať vhodný materiál, do ktorého bude Braggovská mriežka zapuzdrená, z dôvodu lepšej odozvy pri prejazde vozidla po povrchu vozovky a taktiež z dôvodu ochrany, pred zalievaním do asfaltu. Návrh zapuzdrenia mriežky je zobrazený na obrázku 6.7.



Obrázok 6.7: Návrh zapuzdrenia FBG do PDMS materiálu

Senzor, ktorý je implementovaný vo vozovke a na ktorom prebiehali prvé meranie je zapuzdrený práve v tomto materiály. Keďže si nemôžeme vyfrézovať cestu, do ktorej majú byť senzory implementované kdekoľvek, som teda obmedzený výberom jedného materiálu, do ktorého bude mriežka zapuzdrená. Z predchádzajúcej kapitoly je vidieť, že senzor, ktorý je už implementovaný vo vozovke a je práve zapuzdrený v materiály PDMS, preukázal dobrú odozvu pri prejazde vozidlom. Tento senzor je vo vozovke implementovaný už dlhšiu dobu, teda vydržal všetky ročné obdobia, čo bolo ďalším dôvodom prečo som si vybral tento materiál, pre výrobu nových senzorov.

Z predchádzajúcej kapitoly som určil, že pre pokrytie celej šírky vozovky je potreba 5 senzorov. Aby sa parametre mojich senzorov zhodovali s implementovaným senzorom, bolo nutné dodržať tvar a rozmery. Použil som rovnakú formu, ktorej rozmery boli  $60 \times 30 \times 5$  mm. Forma do ktorej bolo uložené vlákno a následne vlákno zaliate je zobrazená na obrázku 6.8.



Obrázok 6.8: Forma pre PDMS

Po naštudovaní potrebnej literatúry o materiály PDMS pred samotným umiestnením vlákna s FBG predchádzala príprava zmesi. Jednotlivé zložky (Silicon Elastomer a vytvrdzovacie činidlo) som naberal rovno do injekčnej striekačky z príslušných nádob. Najskôr som naberal Silicon Elastomer 184 a následne som pridával vytvrdzovacie činidlo a to v doporučenom pomere 10:1. Vzhľadom k rozdielnym hustotám kvapalín bolo treba výslednú zmes manuálne premiešať, aby sa vytvrdzovacie činidlo rozptýlilo v celom Silicon Elastomere, a nie len po jeho hornej časti kam sa nalialo.

Po dôkladnom premiešaní zmesi v nádobe som si nachystal vlákno s FBG do formy na vytvrdenie materiálu PDMS tak ako je zobrazené na obrázku 6.8. Po napnutí vlákna som pomocou



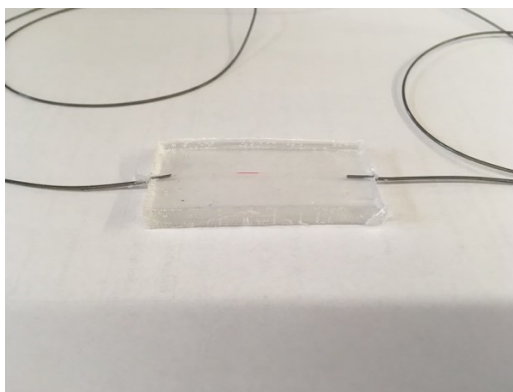
striekačky nabral zmiešanú zmes a striekol do formy s napnutým optickým vláknom. Vo forme pri vstreknutí zmesi sa vytvárali malé bublinky, ktoré bolo treba odstrániť. To som docielil tým, že som formu spolu s optickým vláknom a vstreknutou zmesou umiestnil do chladničky. Následne som sledoval či sa bublinky odstránili. Presný čas vymiznutia bubliniek sa nedá určiť, ten záležal od počtu vzniknutých bubliniek a od ich veľkosti.

Po vymiznutí bubliniek v vstreknutej zmesi nasledovalo umiestnenie formy spolu so zmesou a optickým vláknom do mikrovlnnej rúry na približne 15 až 20 minút. Teplotu som nastavil na 50 °C. Po vložení formy bolo potrebné dbať na to, aby sa optické vlákno neohlo a tým nevyliezlo zo vstreknutej zmesi do formy. Tento prípad nastal pri každom vytváraní senzora a preto bolo potrebné vlákno znovu napnúť ako je zobrazené na obrázku 6.9.

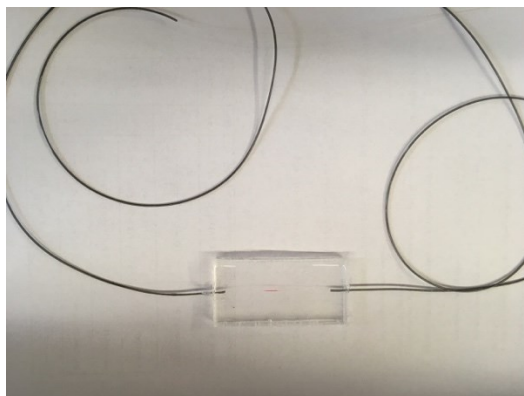


Obrázok 6.9: *Napnuté vlákno s FBG vo forme pre PDMS*

Po vytvrdnutí som PDMS spolu s vláknom pomaly vyrezal z formy, tak aby nedošlo k poškodeniu. PDMS po vyrezaní s formy spolu s FBG je zobrazené na obrázku 6.10 a 6.11. Tento postup som opakoval pre následné vytvorenie štyroch senzorov z FBG.



Obrázok 6.10: *Vybratie hmoty z formy po vytvrdnutí*



Obrázok 6.11: *Novo vytvorený PDMS senzor*

Po vytvorení všetkých jednotlivých senzorov ich bolo potrebné prepojiť, tak ako je písané v kapitole 6.5 o návrhu senzorového pásu z FBG. Keďže mechanické spojky by boli obmedzujúce pri implementovaní do vozovky z dôvodu ich geometrie, som spojenie vlákien riešil zvaraním. Medzi jednotlivými Braggovskými mriežkami bola vzdialenosť 600 nm. Na jednu stranu som privaril zváracou na optické vlákna dlhšieho vlákna s konektorom, ktorý slúži na pripojenie zdroja žiarenia spolu s vyhodnocovacou jednotkou.

Z tabuľky 6.2 je vidno ako sa Braggovská vlnová dĺžka menila počas výroby jednotlivých PDMS senzorov. V predchádzajúcej kapitole je vypočítaný odstup medzi jednotlivými Braggovskými vlnovými dĺžkami 6,1 nm, ale po vytvrdnutí jednotlivých materiálov, či už PDMS alebo zaliatí do vozovky sa tento odstup menil. Po zaliatí do vozovky je najmenší odstup medzi dvoma mriežkami 5,9 nm. Keďže sú tieto mriežky vedľa seba, dôjde pri prejazde vozidlom k zmene vlnovej dĺžky na oboch mriežkach, z čoho vyplýva, že táto hodnota by nemala spôsobiť prekrytie vlnových dĺžok. V ostatných prípadoch je odstup Braggovských vlnových dĺžok vyšší ako 6,1 nm.

Tabuľka 6.2: *Zobrazenie zmeny vlnovej dĺžky*

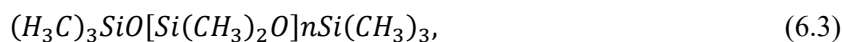
Navrhnutá $\lambda_B$ [nm]	Použitá $\lambda_B$ [nm]	$\lambda_B$ po vytvrdnutí PDMS [nm]	$\lambda_B$ po zaliatí senzoru do vozovky (nevytvrdnutý zalievací materiál)	$\lambda_B$ po zaliatí senzoru do vozovky (vytvrdnutý zalievací materiál)
1529,400	1529,843	1529,505	1530,026	1529,932
1535,500	1540,031	1539,943	1540,396	1540,257
1541,600	1547,613	1545,284	1546,365	1546,949
1547,700	1554,371	1554,300	1555,161	1555,154
1553,800	1560,399	1560,882	1561,118	1561,093

### 6.3.1 Polydimethylsiloxan (PDMS)

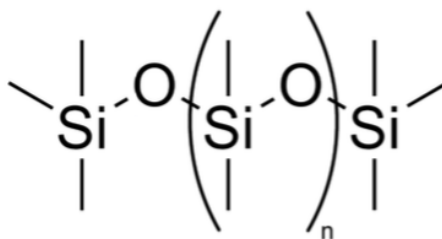
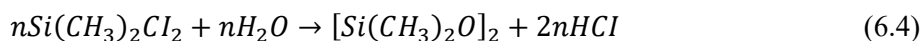
Materiálom pre výskum v tejto práci je polydimetylsiloxán (PDMS), je to polymér na báze silikónu. PDMS je najrozšírenejší organický polymér na báze kremíka a je obzvlášť známy svojimi neobvyklými reologickými vlastnosťami. Jeho aplikácie sa pohybujú od kontaktných šošoviek a zdravotníckych pomôcok až po elastoméry. Taktiež sa vyskytuje v šampónoch (dimetikón robí vlasy lesklé a klzké), tesniace, mazacie oleje a teplu odolné dlaždice. PDMS je opticky čistý a všeobecne sa považuje za inertný, netoxický a nehorľavý. Občas sa nazýva dimetikón a je jedným z niekoľkých typov silikónového oleja (polymerizovaného siloxánu). [2,3]

Pri dlhých časových úsekoch sa PDMS chová ako viskózna kvapalina, ale v krátkych dobách prietoku pôsobí ako elastická pevná látka. PDMS je polymérny organicko-kremičitá látka s vynikajúcimi teplotnými odolnosťami, biokompatibilitou a flexibilitou.

Chemická rovnica pre PDMS je:



kde  $n$  je číslo opakujúceho sa monomeru  $[SiO(CH_3)_2]$  jednotky. Je to vzorec, ktorý je zobrazený na obrázku 6.12. Priemyselná syntéza začína nasledujúcou reakciou z dimetylchlórsilánu a vody:



Obrázok 6.12: Chemický vzorec PDMS

Sieť PDMS polyméru sa zostavuje zosieťovaním týchto polymérnych reťazcov. Dlhé PDMS reťazce polymérov majú zvyčajne vinylové skupiny na každom konci. Krátkym zosieťovacím činidlom je polymetylhydrosiloxán, ktorý spája reťazce PDMS. Táto reakcia môže byť katalyzovaná platinou.

PDMS sa nečastejšie získava z oxidu kremíka, ktorý je aj základnou surovinou pri výrobe skla, alebo z látok obsahujúcich polysiloxan. Polydimethylsiloxan sa často používa priamo v dodávanom stave podobnému želatíne alebo ako kvapalina, obsahujúca 4 % až 5 % silikagelu, prípadne vo forme vodnej emulzie, ktorá vedľa silikagelu obsahuje tiež emulgačné a konzervačné prísady. Z kvapalín, ktoré obsahujú silikagel (je granulovaná, pórovitá forma oxidu kremičitého ( $SiO_2$ ) vyrábaná synteticky z kremičitanu sodného), sa dá polydimethylsiloxan izolovať odstredením pri cca 20 000 ot./min. v odstredivej miešačke.

## 6.4 Výroba senzoru z hliníkovej trubičky

Aby som mohol vypočítať rýchlosť vozidla pri prejazde vozidla potrebujem vedieť jeho rázvor (vzdialenosť od jednej nápravy po druhú), čo by bolo potrebné mať zdĺhavú databázu všetkých vyrobených vozidiel pretože každé vozidlo má iný rozmer rázvoru alebo využiť ďalší FBG senzor, ktorý bude v určitej vzdialenosti od spomínaných senzorov z PDMS.

Na vytvorenie ďalšieho senzoru som využil hliníkovú trubičku do ktorej som umiestnil optické vlákno. Chcel som využiť aj iný typ senzoru ako vyrobeného z PDMS, z dôvodu pozorovania odozvy inej konfigurácie ako v prípade PDMS. V strede trubičky sa nachádzala Braggovská mriežka. Optické vlákno v trubičke bolo v sekundárnej ochrane a na oboch koncoch hliníkovej trubičky som vlákno obalil ešte do primárnej ochrany. Optické vlákno som na oboch koncoch následne umiestnil do prístroja, pomocou ktorého som vlákno našponoval pre lepšiu odozvu pri prejazde vozidla po trubičke. Po našponovaní som primárnu ochranu vlákna prilepil k trubičke aby aj po uvoľnení z nástroja ostalo vlákno našponované.

Po vyrobení takéhoto senzoru som skúsil prechádzať vozidlom po trubičke. Umiestnenie trubičky na vozovke je možné vidieť na obrázku 6.13, 6.14.



Obrázok 6.13: *FBG s optickým vláknom vložená v hliníkovej trubičke*



Obrázok 6.14: *Prejazd vozidla po hliníkovej trubičke s FBG*

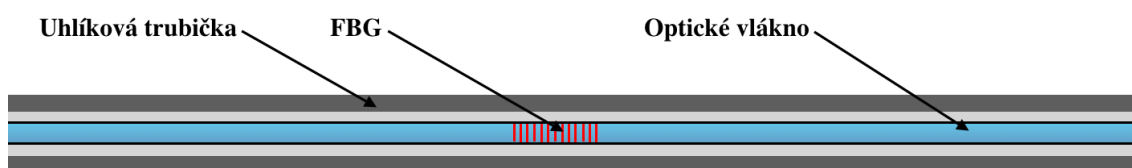
Hliníková trubička bola dlhá 0,5 m, čo je viac ako šírka pneumatiky vozidla. Tým som mohol sledovať odozvu Braggovskej mriežky keď vozidlo s kolesom prejde len po časti hliníkovej trubičky.

### 6.5 Výroba senzoru z uhlíkovej trubičky

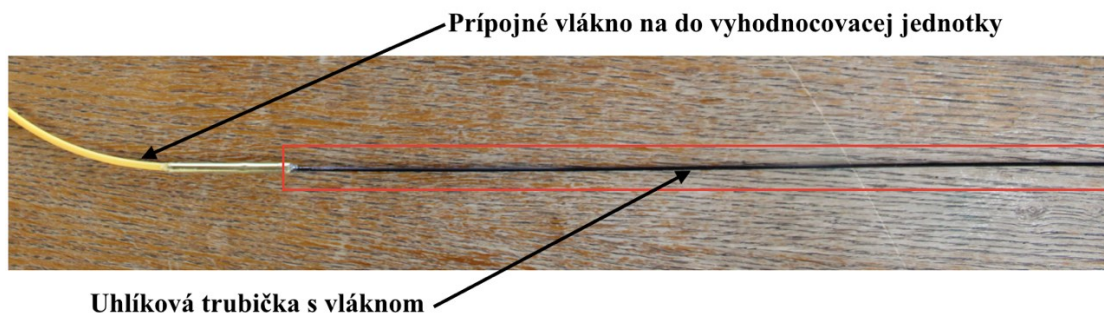
Braggovská mriežka poskytla v hliníkovej trubičke dostatočnú odozvu na detekovanie prejazdov vozidla. Avšak pri umiestňovaní optického vlákna do trubičky nastal problém, ktorý sa týkal vyrovnania trubičky. Koncept návrhu senzoru s trubičkou spočíva v tom aby bola v celej dĺžke optického vlákna v trubičke bola použitá len jedna Braggovská mriežka. Tá bude mať najlepšiu odozvu ak bude optické vlákno v trubičke napnuté tak, aby sa trubičky nedotýkalo. To však bol problém pri hliníkovej trubičky, ktorá sa nedala dokonalo vyrovnať a tak sa stalo, že v niektorých miestach sa optické vlákno dotýkalo vnútorných stien trubičky.

Preto som sa rozhodol namiesto hliníkovej trubičky zvoliť iný materiál trubičky, a to konkrétne uhlík. Táto trubička bola odrezaná na dĺžku rovnakej ako bolo v prípade retiazky z PDMS senzorov a to 320 cm. Vonkajší priemer trubičky je 1,5 mm a vnútorný priemer 0.6 mm. Po vystretí ostala trubička

na zemi rovná a tak nebolo nutné opakované vyrovnanie ohybov trubičky ako v prípade hliníkovej trubičky. Vláknó sa teda po vystretí trubičky naplo aby sa nedotýkalo vnútorných stien trubičky a následne prilepilo na koncoch trubičky. Zobrazenie prierezu tohto typu senzoru je zobrazené na obrázku 6.15. Postup výroby tohto senzoru je rovnaký ako v prípade hliníkovej trubičky. Na obrázku 6.16 je zobrazená časť vyrobeného senzoru z uhlíkovej trubičky. S ohľadom na použité Braggovské vlnové dĺžky pri PDMS senzorocho som použil pre senzor z uhlíkovej trubičky Braggovskú vlnovú dĺžku 1510,044 nm. Po zalepení koncov trubičky s vláknom bola FBG predopnutá na hodnotou vlnovej dĺžky 1510,5 nm.



Obrázok 6.15: Schéma senzoru z uhlíkovej trubičky



Obrázok 6.16: Vytvorený senzor z uhlíkovej trubičky

### 6.5.1 Uhlíkový materiál

Uhlík je šiesty prvok periodickej sústavy prvkov. V zemskej kôre je obsah uhlíka okolo jedného promile, predovšetkým ide o pozoruhodný prvok, ktorý hrá v prírode veľmi dôležitú rolu. Vďaka svojej atómovej štruktúre dokáže tvoriť obrovské množstvo anorganických aj organických zlúčenín, ktorých je dnes známo viac ako 6 miliónov a tento počet neustále rastie. Uhlík je tiež základom živej hmoty. V prírode sa uhlík vyskytuje vo väčšine vo forme zlúčenín, či už v karbonátových horninách, vo vzduchu ako oxid uhličitý alebo súčasť ropy, uhlia a zemného plynu. Okrem vysokej pevnosti v ťahu sa uhlíkové vlákno vyznačuje aj vynikajúcou odolnosťou voči agresívnym chemikáliám, vysokej teplote a má nízku tepelnú rozťažnosť. Tieto vlastnosti spolu s veľmi nízkou hmotnosťou ho predurčujú ako vynikajúci konštrukčný materiál v leteckej a kozmickej technike, športových potrebách, motoristickom športe aj armáde. Pri niektorých aplikáciách je nahrádzaný najmä kevlarovým vláknom, ktoré má podobné vlastnosti, ale je podstatne lacnejšie na výrobu.

## 6.6 Implementácia senzorov do vozovky

Po konečnej výrobe všetkých potrebných senzorov z PDMS a senzoru z uhlíkovej trubičky bola do asfaltu vyrezaná drážka o dĺžke 3,8 m (rezerva na prírodné vlákno senzorov) kolmo na okraj vozovky



s hĺbkou 1 cm a šírkou tiež 1 cm. V mieste umiestnenia kde sa nachádzal PDMS senzor bola šírka zväčšená na približne 5 cm, tak aby vošiel senzor PDMS do vyrezanej drážky (viď obrázok 6.17).



Obrázok 6.17: *Vloženie PDMS senzora do vozovky*

Koniec optického vlákna oboch senzorov, bol vyvedený vedľa vozovky kde sa umiestnila skrinka na pripojenie ostatných senzorov umiestnených vo vozovke a taktiež kde sa aj pripája vyhodnocovacia jednotka. Podobným spôsobom bola do vozovky umiestnená aj uhlíková trubička (viď obrázok 6.18), pre ktorú bola vyrezaná drážka s rovnakými rozmermi.



Obrázok 6.18: *Implementácia senzoru z uhlíkovej trubičky*

Vzdialenosť medzi PDMS senzormi a uhlíkovou trubičkou je 1m. Táto vzdialenosť bude slúžiť pre vypočítanie rýchlosti prechádzaných vozidiel. Pre výpočet sa bude následne používať čas prejazdu po uhlíkovej trubičke a čas prejazdu po PDMS senzorochoch.



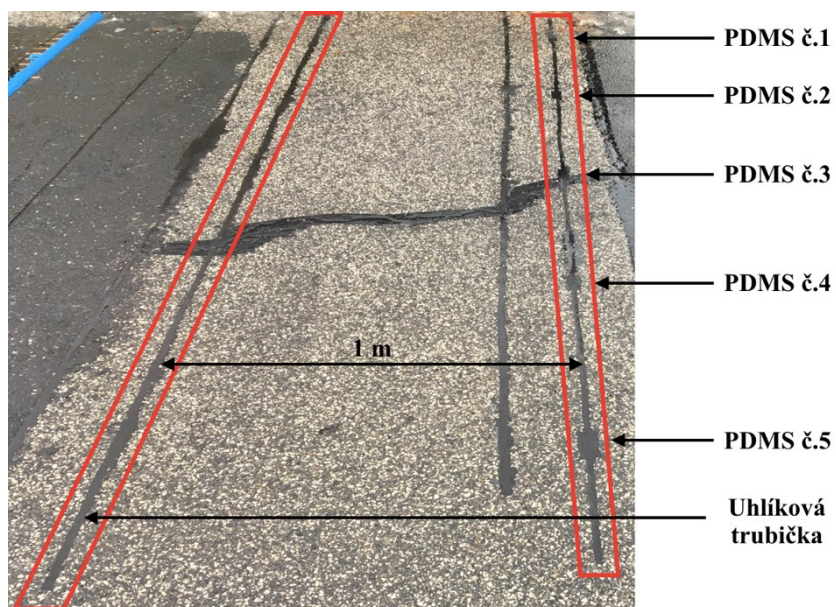
Obrázok 6.19: *Vyvedenie optického vlákna zo senzorov mimo vozovku*

Po umiestnení oboch typov senzorov do vozovky boli senzory zaliaté studenou zalievacou zlučeninou, ktorú je možné nájsť pod názvom Biolast 2K. Je vyrobená výhradne z obnoviteľných surovín a využíva sa na vyplnenie medzier alebo trhlín v asfaltovom alebo betónovom povrchu. Príklad ako vyzerá už konkrétny zaliaty PDMS senzor je zobrazený na obrázku 6.20.



Obrázok 6.20: *Zalievanie PDMS senzora*

Po zaliatí všetkých senzorov bolo potrebné dbať na to aby minimálne pol hodinu neprešlo žiadne vozidlo z dôvodu vytvrdnutia zalievacej zlučeniny. Výsledné umiestnenie senzorov po zaliatí je zobrazené na obrázku 6.21. PDMS senzory sú označené od čísla 1 do 5 a to aj vo vyhodnocovacej jednotke, z dôvodu následnej lepšej analýzy nameraných dát. Uhlíková trubička sa nachádza 1 m od PDMS senzorov. Ako už bolo spomínané práve táto vzdialenosť bude slúžiť na výpočet rýchlosti vozidla, ktoré prešlo cez vozovku. Drážky pre retiazok z PDMS senzorov a taktiež pre uhlíkovú trubičku boli vyrezané kolmo na okraj vozovky kvôli lepšej odozvy senzorov. V prípade, keby boli senzory pod uhlom od kraja vozovky, mohlo by dôjsť k prípadu kedy senzory by mohli analyzovať namiesto dvoch náprav štyri nápravy. To znamená že pokiaľ sú senzory kolmo na okraj vozovky, kolesá jednej nápravy prejdú cez senzor v rovnaký čas. V prípade kedy boli senzory pod uhlom od kraja vozovky by senzory mohli vyhodnotiť na jednej náprave najskôr prejazd jedného kolesa a následne druhého.

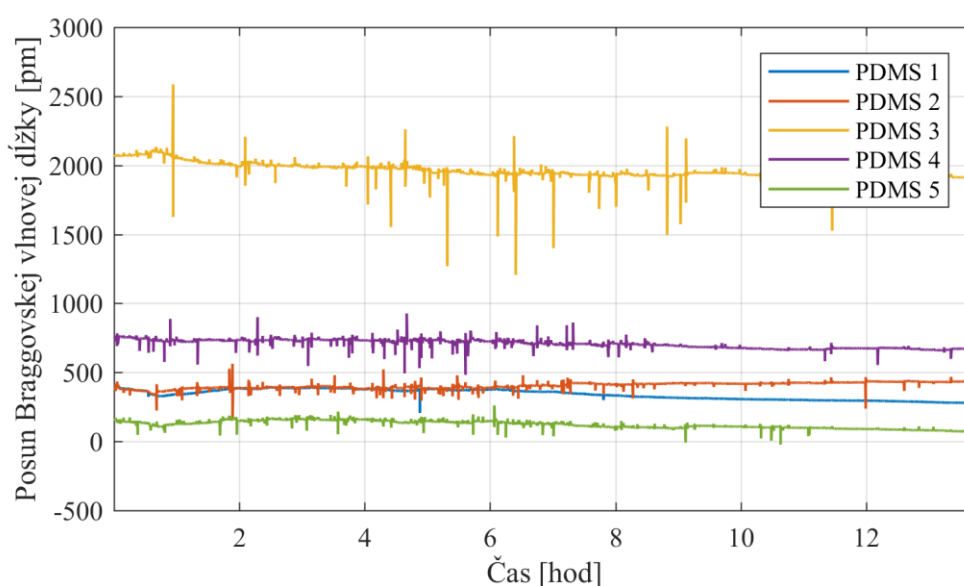


Obrázok 6.21: Rozloženie senzorov vo vozovke



## 7 Spracovanie meraní po implementácii senzorov do vozovky

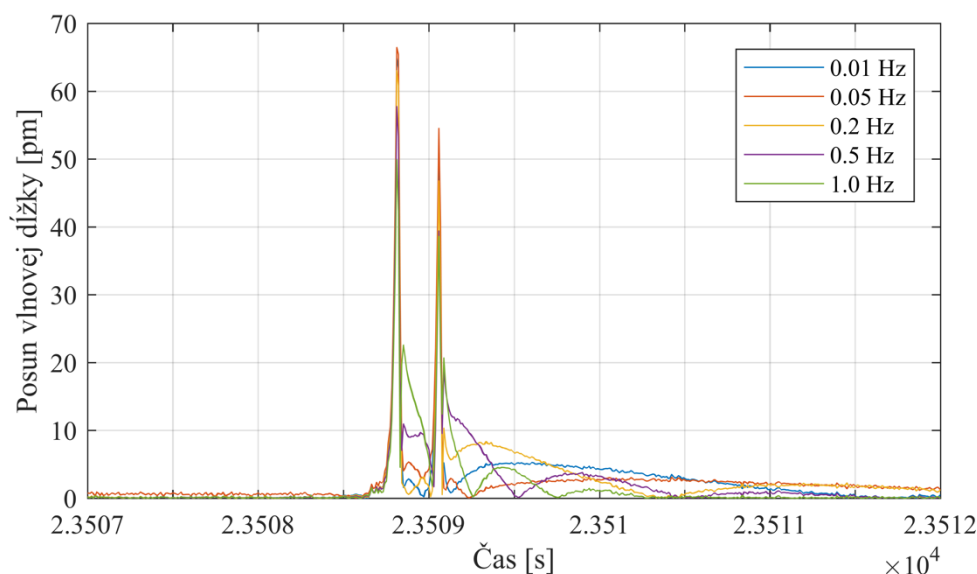
Na obrázku 7.1 je zobrazený graf z výstupu PDMS senzorov z prvého praktického merania na ulici Hlubočická v Ostrave. Meranie prebiehalo viac ako pol dňa, od približne desiatej hodiny a štyridsiatej minúty a k ukončeniu merania došlo po desiatej hodine večer. V tomto grafe sú zobrazené odozvy jednotlivých PDMS senzorov. Ďalej je možné vidieť, že senzory majú rôzne posuny Braggovskej vlnovej dĺžky. To je spôsobené práve tým, že po vytvrdnutí materiálu došlo k posunu zmeny Braggovskej vlnovej dĺžky senzorov a taktiež, že vyrezané drážky na jednotlivé PDMS senzory neboli rovnako hlboké a preto bola aj rôzna vrstva zalievacej hmoty. Vplyv na posun vlnovej dĺžky má aj teplota vozovky.



Obrázok 7.1: Zobrazené prejazdy vozidiel z jednotlivých PDMS senzorov

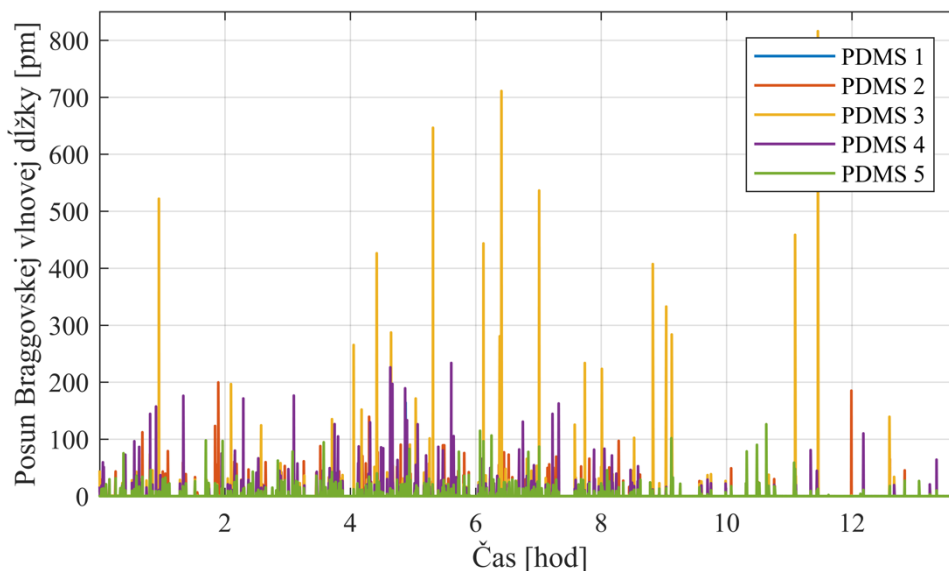
### 7.1 Spracovanie nameraných dát z PDMS senzorov

Pre prehľadnejšie spracovávanie dát bolo potrebné vykonať niekoľko úprav. Všetky dáta boli spracovávané so vzorkovacou frekvenciou 1 kHz. Ako prvé som aplikoval na namerané dáta filter typu HP (horná prepust'), spolu s prepočítaním dát do absolútnych hodnôt aby v grafe boli dáta len v kladnej časti x-ovej osy. Vo filteri som nastavoval parameter pre meznú frekvenciu, tak aby sa dali dáta čo najlepšie analyzovať. Na obrázku 7.2 je porovnanie nastavených hodnôt meznej frekvencie so sčítaním všetkých PDMS senzorov.



Obrázok 7.2: Porovnanie nastavenej meznej frekvencia filtra pre senzory PDMS

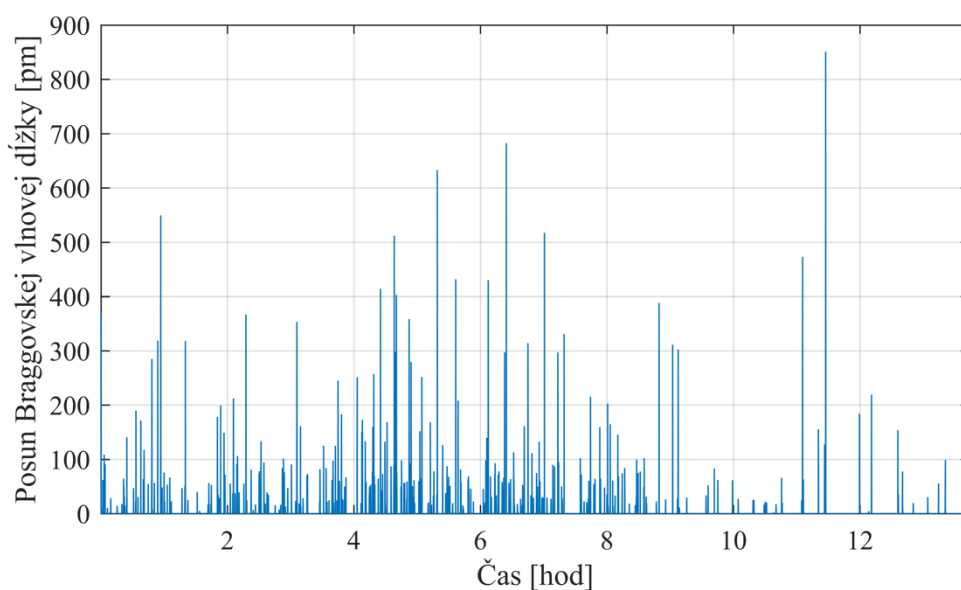
Filter pomohol z priebehu eliminovať vplyv teploty na posun Braggovskej vlnovej dĺžky a šum ktorý bol spôsobený okolitými vibráciami. Z môjho pohľadu je najlepšie nastavenie meznej frekvencie na hodnotu 0,05 Hz. Pri tejto frekvencii klesol šum najrýchlejšie na najmenšiu hodnotu v porovnaní s ostatnými nastavenými hodnotami. Na obrázku 7.3 je zobrazený graf už s použitým filtrom HP so všetkými senzormi PDMS.



Obrázok 7.3: Zobrazené prejazdy vozidiel z jednotlivých PDMS senzorov s použitím filtra typu HP

Je vidieť, že po aplikovaní filtra sa priebeh grafu upravil a jednotlivé priebehy vozidiel sú lepšie čitateľné. Farebným odlíšením jednotlivých PDMS senzorov, ktorý konkrétny senzor najviac detekoval prejazd vozidla. Priebeh senzoru č.1 zobrazený modrou farbou v grafe, nie je dostatočne vidno. To je dané predovšetkým z dôvodu, že tento senzor sa nachádza najbližšie k okraju vozovky a v tomto mieste prejde vozidlo kolesom najmenej z celej šírky vozovky. Naopak najviac detekujúcim senzorom je

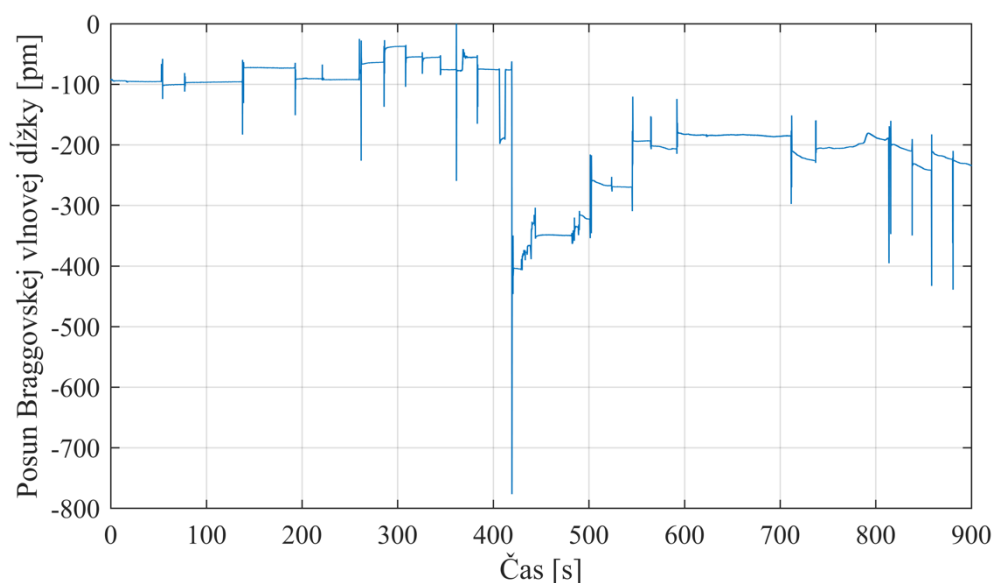
PDMS senzor č.3. Ten je umiestnený v strede vozovky. Ale menšej odozve detekcie prechádzaných vozidiel krajných senzorov, aj tie prispievajú k zlepšeniu konečného výsledku. Vo výsledku sú hodnoty posunu Braggovskej vlnovej dĺžky sčítané a výsledok je zobrazený v grafe na obrázku 7.4. Z takéhoto grafu už je zas lepšie analyzovať prejazdy vozidiel. Aby som nemusel prejazdy ručne z grafu počítať som použil v SW Matlab funkciu findpeak, ktorá ponúka veľa možností nastavenia. Tu som si mohol nastaviť časovú odozvu medzi jednotlivými prejazdmi, aby funkcia nezapočítavala obe nápravy vozidla, ale vždy len jednu. A ďalším dôležitým parametrom tejto funkcie je minimálna výška peaku. Po aplikovaní tejto funkcie bolo detekovaných 301 prejazdov a to za celkový čas 13,7 hodín. Po spracovaní dát som ešte vypočítal hodnotu SNR a dostal som sa na hodnotu 44,89 dB.



Obrázok 7.4: Výsledné zobrazenie odozvy na prejazdy všetkých PDMS senzorov

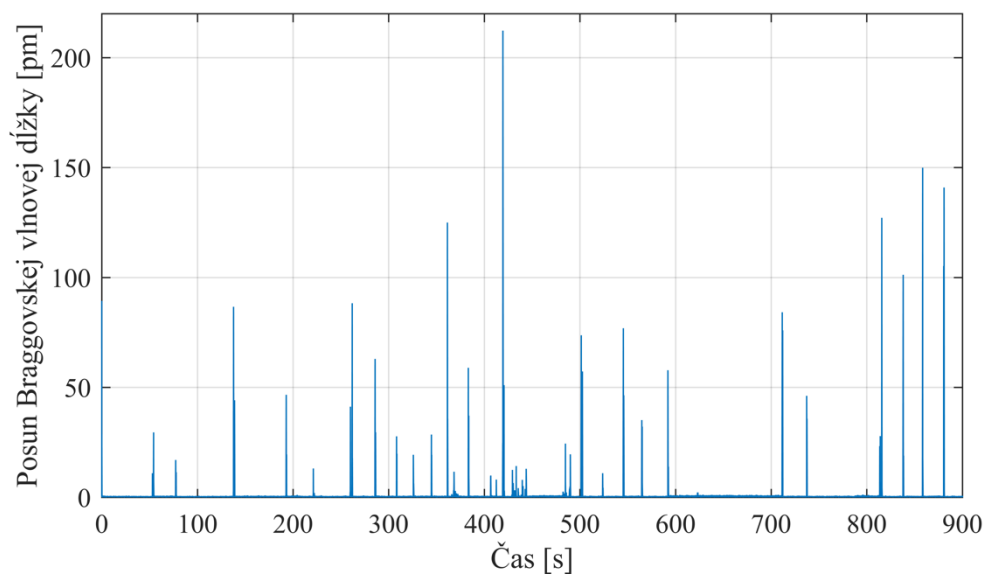
## 7.2 Spracovanie nameraných dát zo senzoru z hliníkovej trubičky

Tento typ senzoru bol dôležitým prínosom pri návrhu finálneho senzoru z uhlíkovej trubičky. Hliníková trubička mala dĺžka len 0,5 m, a bola využitá len na experimentálne overenie chovania jednej Braggovskej mriežky v celej šírky trubičky. Týmto spôsobom by došlo k ušetreniu Braggovských mriežok pri vytváraní senzoru na meranie rýchlosti vozidiel. Odozva Braggovskej mriežky je zobrazená na obrázku 7.5.



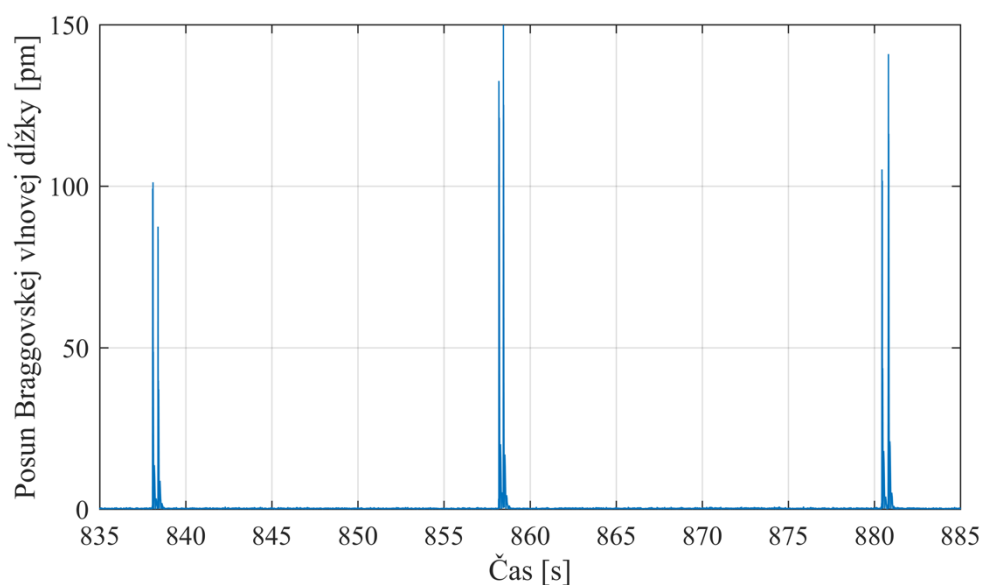
Obrázok 7.5: Odozva FBG pri prejazde vozidlom

Okolité teplota výrazne ovplyvňuje odrazenú vlnovú dĺžku Braggovskej mriežky ( $10 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ ). Začiatok priebehu je posunutý o  $-92,12 \text{ pm}$ . Najväčšiu zmenu vlnovej dĺžky bola zaznamenaná v  $419,5 \text{ s}$  a to konkrétne na hodnotu  $-767,2 \text{ pm}$ . Pre lepšie zobrazenie priebehu a úpravu grafu som použil na namerané dáta filter typu horná priepust – HP s nastavením meznej frekvencie na hodnotu  $0,05 \text{ Hz}$  a typom butterworth. Tento typ filteru neprepúšťa signál s nízkymi frekvenciami a keďže ja som potreboval len peaky ktoré boli od vozidiel, bol tento filter pre moju aplikáciu najvhodnejší. Následne som hodnoty prepočítal do absolútnych aby bol graf lepšie čitateľný a jednotlivé prejazdy lepšie detekovateľné. Tento priebeh je zobrazený na obrázku 7.6. Po použití filtera je možné celý priebeh lepšie analyzovať. Z grafu je vidieť, že pri niektorých prejazdoch Braggovská mriežka reagovala lepšie. Tomu dochádza keď vozidlo prejde presne v strede hliníkovej trubičky. Maximálna zmena vlnovej dĺžky bola zaznamenaná tak isto ako pred úpravou v čase  $419,5 \text{ s}$ , ale v dôsledku úpravy je posun vlnovej dĺžky o  $212,3 \text{ pm}$ .



Obrázok 7.6: Odozva FBG pri prejazde vozidlom s použitím filtra typu HP

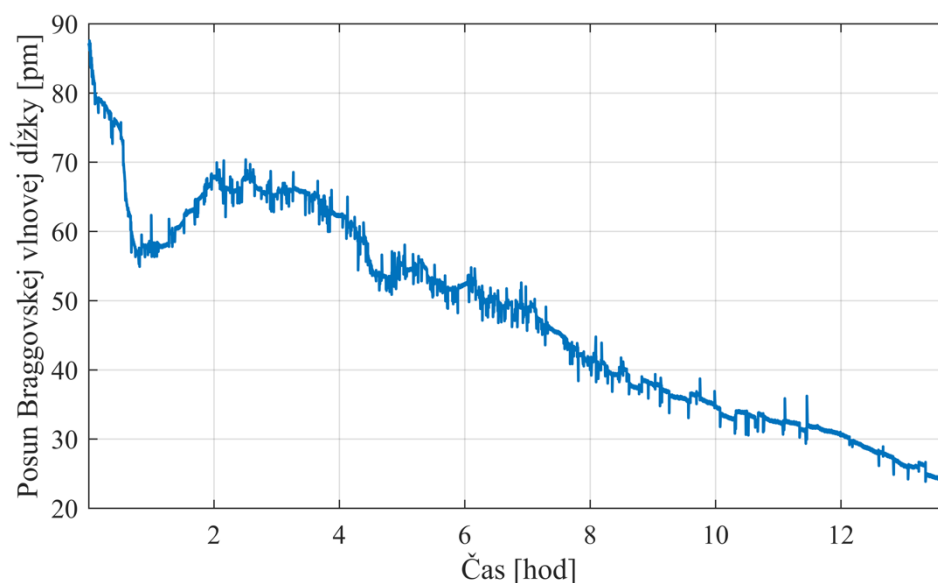
Na vypočítanie počtu prejazdov v SW Matlab som použil funkciu `findpeaks`, ktorá ponúka možnosti pre nastavenie potrebných parametrov ako sú vzdialenosť jednotlivých prejazdov vozidla tak by mi počítalo vždy len jednu nápravu vozidla a nastavenie minimálneho peaku, tak aby funkcia nezapočítala prípadný šum. Po zadaní týchto parametrov som dostal počet prejazdov, ktorý zodpovedá reálnemu počtu prejazdov v dobe merania vyhodnocovacou jednotkou a to konkrétne 29. Na obrázku 7.7 je zobrazený detail na tri po sebe idúce prejazdy. Vedľa seba sú vždy dva peaky, ktoré predstavujú dve nápravy na vozidle. Funkcia `findpeak` výrazne pomáha pri hľadaní prejazdov z merania, ktoré prebiehali dlhší čas. Pretože z takéhoto grafu nebolo voľným okom vidno niektoré prejazdy a práve táto funkcia ich pri zadaní vhodných parametrov ich označila.



Obrázok 7.7: Detail odozvy FBG na prejazdy po hliníkovej trubičke

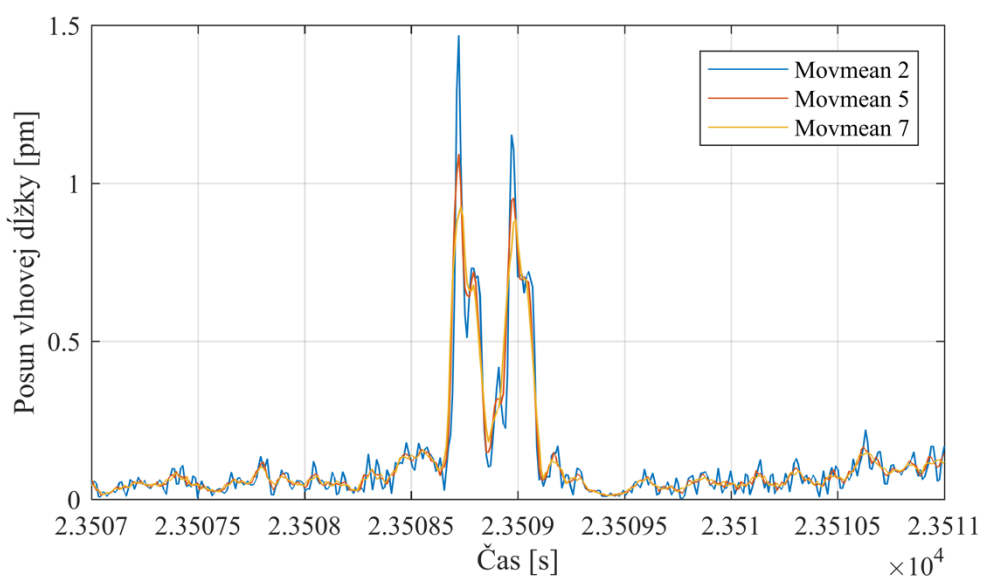
### 7.3 Spracovanie nameraných dát zo senzoru z uhlíkovej trubičky

Ako už bolo spomenuté na výpočet rýchlosti sa pri konečnom návrhu senzorov použila uhlíková trubička. Priebeh odozvy FBG v uhlíkovej trubičke na reakcie pri prejazde vozidiel je zobrazený na obrázku 7.8. Opäť je začiatok posun Braggovskej vlnovej dĺžky posunutý a následne sa vplyvom teploty mení odrazená vlnová dĺžka mriežky.



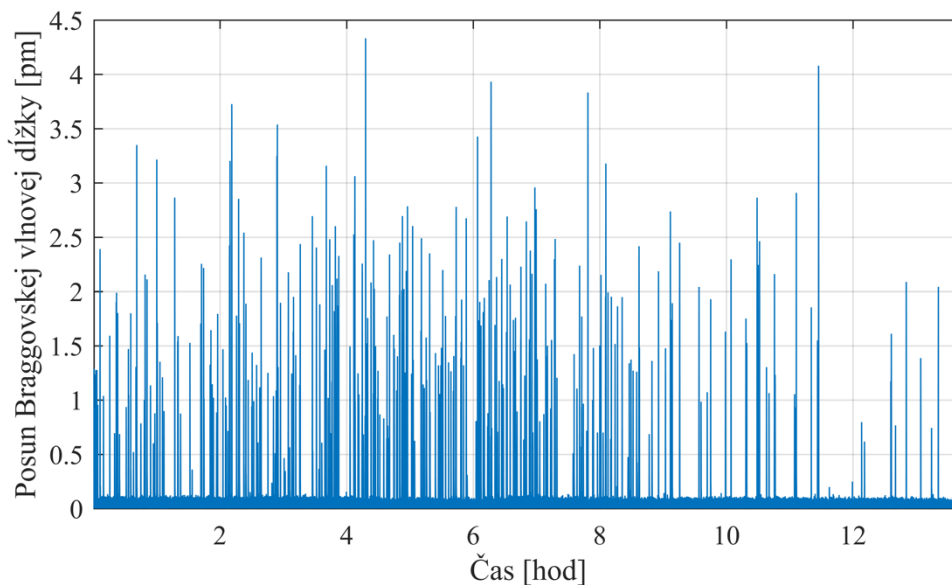
Obrázok 7.8: Priebeh z FBG v uhlíkovej trubičke

Taktiež aj pri tomto type senzora bola použitá vzorkovacia frekvencia 1 kHz. Aj tu som aplikoval na namerané dáta filter typu HP s nastavenými parametrami ako v prípade PDMS senzorov. Aj v tomto prípade som po aplikovaní filtra vypočítal hodnotu SNR, ktorá vyšla 41,73 dB. Navyše v tomto type senzora (z uhlíkovej trubičky) bola použitá funkcia movmean z dôvodu nedostatočného zobrazenia prejazdov. Táto funkcia zoberie vždy počet vzoriek podľa nastaveného parametra, z ktorých vypočíta priemer. Teda ak bude mať funkcia movmean nastavený parameter na hodnotu 5, zoberie 5 vzoriek, z ktorých vypočíta priemer a vykreslí do grafu a posunie sa o jednu vzorku. Následne znova zoberie 5 vzoriek a vykreslí do grafu. Tento postup sa stále opakuje. Vďaka tomu je krivka priebehu ešte viac vyhladená. Pri prvom nastavení som opäť porovnával vhodné nastavenie parametra. V prípade grafu na obrázku 7.9 sú 3 nastavenia funkcie movmean pre nastavený parameter 2, 5 a 7.



Obrázok 7.9: Porovnanie priebehu pre rôzne nastavenie parametra movmean

Vhodný parameter pre nastavenie funkcie movmean je 5. Je vidieť, že po nastavení vyššej hodnoty je síce krivka vyhladenejšia ale taktiež sú peaky skreslené. Naopak pri nízkej hodnote je vidno stále veľký šum. Celý priebeh zo senzora je zobrazený na obrázku 7.10.

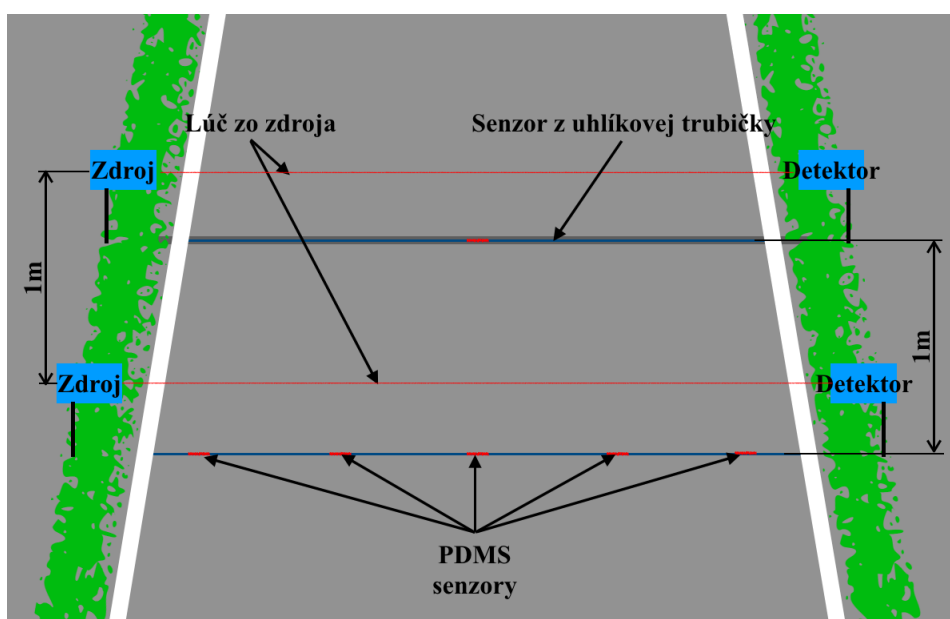


Obrázok 7.10: Zobrazené prejazdy vozidiel z FBG v uhlíkovej trubičke s použitím filtra typu HP

Aj po použití filtra typu HP, v grafe ostal malý šum. Po priblížení jedného prejazdu som prišiel na to, že vlákno v trubičke sa po prejazde vozidlom rozvibruje a trvá mu dlhšiu dobu kým sa ustáli ako je to to v prípade PDMS senzorov. Tým, že je trubička dlhá 3,2 m a optické vlákno je v nej napnuté a zalepené na koncoch trubičky, stačí aj malý otras v okolí trubičky a vlákno začne vibrovať. Detail na jeden prejazd je zobrazený kapitole 9.1 v grafoch na obrázku 9.1. Modrou krivkou sú zobrazené odozvy na prejazdy PDMS senzorov a červenou zas senzora z uhlíkovej trubičky.

## 8 Referenčné meranie pomocou optických brán

Na overenie presnosti merania rýchlosti zo senzorov z Braggovských mriežok, som vykonal prostredníctvom optických brán. Pod pojmom optické brány je myslené, že na jednej strane vozovky sa nachádzajú dva detektory a na opačnej strane vozovky zas dva zdroje žiarenia. Zdroj žiarenia je presne namierený na detektor ktorý vyhodnocuje pokles výkonu zo zdroja žiarenia. Keď prejde vozidlo, na detektore dôjde k poklesu zaznamenávaného výkonu a v detektore sa objaví len šum z okolitého osvetlenia ako napr. od Slnka, čo je ale minimálny zaznamenaný výkon v porovnaní keď do detektora svieti lúč zo zdroja žiarenia. Rozloženie optických brán je zobrazené na obrázku 8.1. Vzdialenosť medzi detektormi je 1m, rovnako ako v prípade vzdialenosti medzi FBG senzorom z uhlíkovej trubičky a PDMS senzormi. Výška umiestnenia detektorov a taktiež zdrojov optických brán nad zemou bola približne 70 cm.



Obrázok 8.1: Rozloženie optických brán na vozovke spolu s FBG

### 8.1 Vyhodnocovacia jednotka na detekciu prejazdov

Na zobrazenie signálu z detektorov bola použitá jednotka Labjack (viď obrázok 8.2). Tá bola umiestnená v plastovej krabicike a prepojená s detektormi pomocou portov Canon 9. Napájanie LabJack bolo pomocou adaptéru, ktoré privádzalo napätie 5V. Na výstup z jednotky LabJack bol pripojený počítač prostredníctvom USB, na ktorom bol spustený program LabView s programom určeným práve na vyhodnocovanie signálov z použitých detektorov.





Obrázok 8.2: *LabJack*



Obrázok 8.3: Napojenie detektorov do krabičky spolu s LabJack

Podobným spôsobom boli napájané aj zdroje žiarenie, ale s tým že do krabičky bolo privedených len 5V a Labjack už nebol potrebný (Obrázok 8.4).



Obrázok 8.4: *Napojenie laserov do krabičky*



(a)



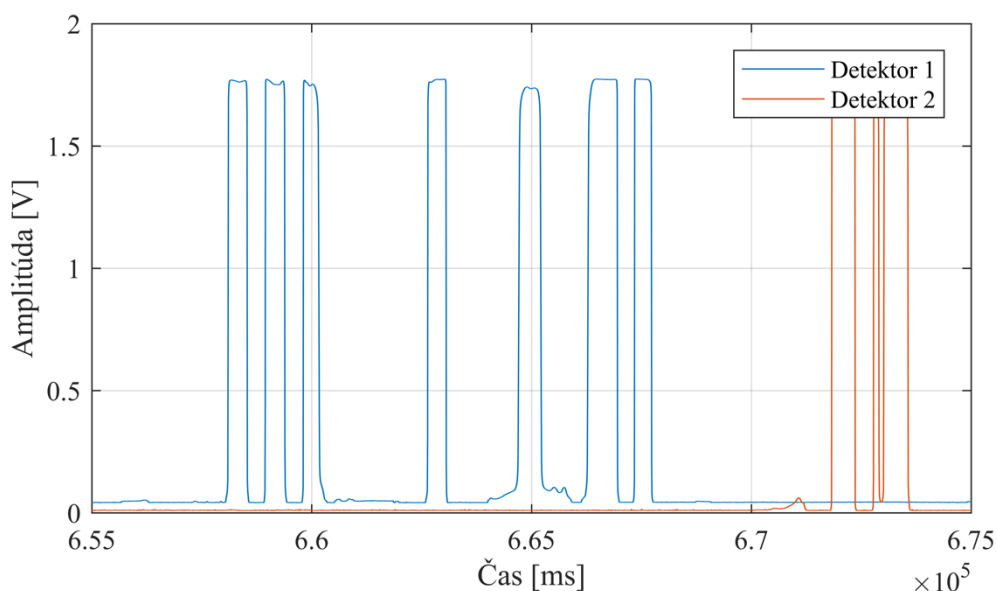
(b)

Obrázok 8.5: (a) *Laser*, (b) *detektor*

## 8.2 Analýza merania

Po zostavení všetkých komponentov a pripojení laserov a detektorov bolo možné spustiť kód v SW LabView. Ten zobrazoval aktuálny priebeh signálu a taktiež ukladal hodnoty do súboru aby ich bolo možné následne analyzovať a vypočítať rýchlosť prechádzajúcich vozidiel.

Program je nastavený tak, aby pri prejazde vozidla sa zdvihla amplitúda signálu. Tá sa pohybovala vždy v rozmedzí od 1.5 V do 2 V. Pri meraní sa občas stalo, že lúč laseru do detektora sa vychýlil a tak meranie bolo neúčinné. Z toho dôvodu bola následná potreba upraviť znova laser aby mieril na detektor. Priebeh signálu pri úprave laseru aby znova lúč smeroval do detektora je možné vidieť na obrázku 8.7. Ďalším ovplyvňujúcim faktorom nepresného merania bolo slnečné žiarenie. Spočiatku merania bolo Slnko prekryté oblakmi, ale ak sa vyjasnilo, slnečné lúče smerovali do detektora. Tie boli intenzívnejšie ako lúč z lasera a preto na detektore nebol zaznamenaný prejazd vozidla. Na obrázku 8.5 (b) je zobrazený detektor, na ktorý som umiestnil molitan a tak zabránil priamemu slnečnému žiareniu do detektora.

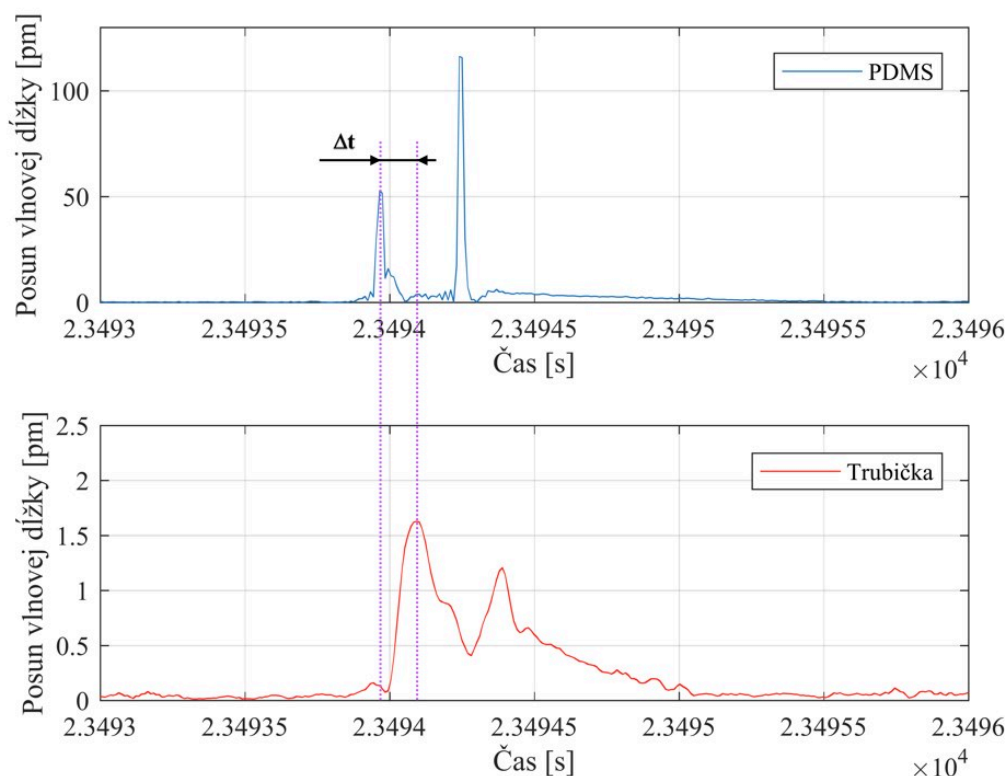


Obrázok 8.7: Nastavenie smeru lúča z lasera do detektora

Pre detekciu jednotlivých prejazdov som použil znova funkciu findpeak podobne ako v prípade senzorov z FBG. Tá zabezpečuje označenie času nábežnej hrany amplitúdy.

## 9 Meranie rýchlosti prechádzaných vozidiel

Oba grafy na obrázku 9.1 sú približené z grafu ktorý je na obrázku 7.4 (PDMS senzory) a na obrázku 7.10 (uhlíková trubička). Pri takomto priblížení jednotlivých prejazdov, je možné vidieť rozdiely medzi odlišnými vyhotoveniami senzorov. Senzor s PDMS je výrazne citlivejší na prejazdy vozidiel a je schopný zaznamenať aj prechod človeka. Posun vlnovej dĺžky pri deformácii teda pri prejazde sa pohybuje v stovkách pm. Trubička je výrazne náchylnejšia na otrasy a občas nie je schopná zaznamenať dostatočne obe nápravy prechádzaného vozidla ako je to u senzoru z PDMS. Posun vlnovej pri prejazde sa už pohybuje len v jednotkách pm.



Obrázok 9.1: Porovnanie prejazdov PDMS senzorov (modrá) a senzoru z uhlíkovej trubičky (červená)

Z týchto grafov si zistím vždy čas prejazdu prvej nápravy ako z grafu pre senzor z uhlíkovej trubičky tak aj pre PDMS senzory. Vzďialenosť medzi trubičkou je 1m a z týchto hodnôt viem podľa vzorca na výpočet rýchlosti vypočítať rýchlosť prechádzaného vozidla.

$$v = \frac{s}{\Delta t}; \quad (9.1)$$

kde  $s$  je vzdialenosť medzi senzormi a  $\Delta t$  je rozdiel časov od prejazdu prvej nápravy vozidla zo senzorov PDMS a zo senzoru z uhlíkovej trubičky. Týmto vzorcom som dostal rýchlosť v jednotkách m/s. Rýchlosť vozidla je udávaná vo väčšine prípadov v jednotkách km/h, preto som aj ja prepočítaval rýchlosť z m/s na km/h. Výsledný vzorec potom je:

$$v = \frac{s}{\Delta t} \cdot 3,6. \quad (9.2)$$

Rýchlosť som počítal vždy podľa času prvej prechádzanej nápravy cez senzory:

$$\Delta t = \text{Čas}_{PDMS\_1} - \text{Čas}_{uhl\_1}. \quad (9.3)$$

Vypočítaná rýchlosť z prejazdu, na obrázku 9.1 je vidieť v tabuľke 9.1.

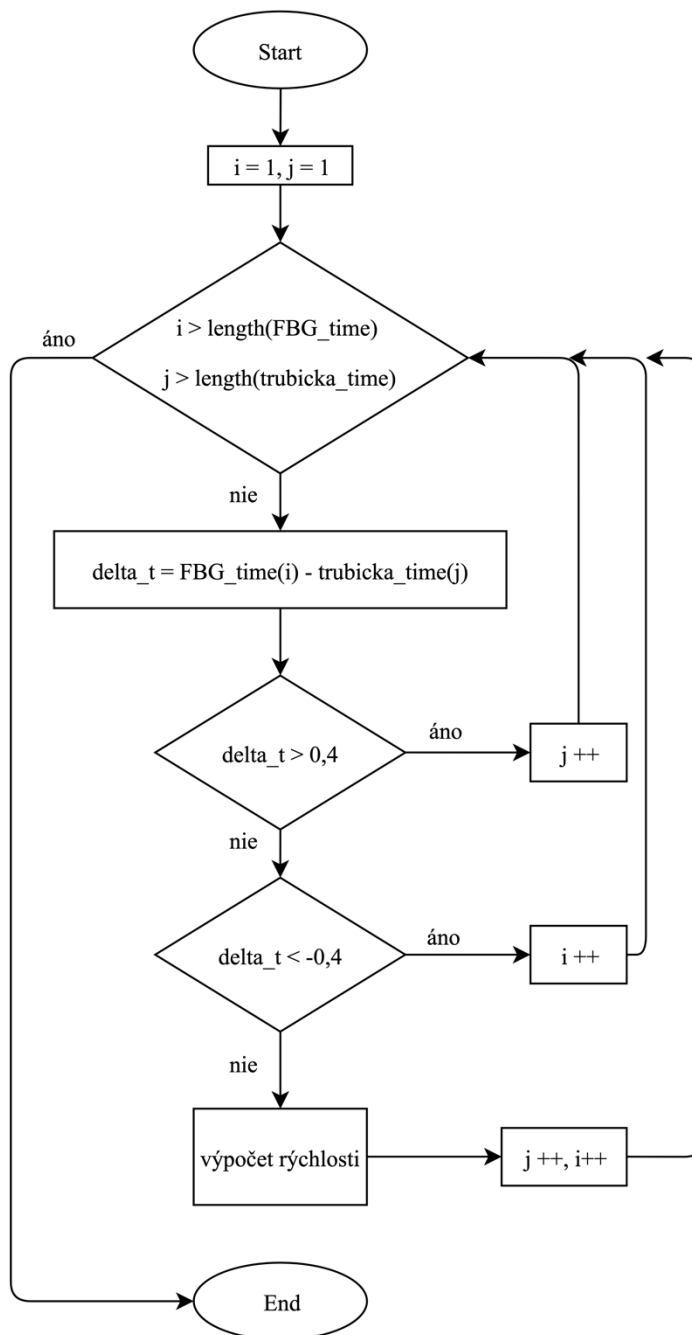
Tabuľka 9.1: Zobrazenie času pri prejazde vozidla

PDMS senzor		Senzor z uhlíkovej trubičky		$\Delta t$ [s]	Vypočítaná rýchlosť prejazdu [km/h]
Čas_PDMS_1 [s]	Čas_PDMS_2 [s]	Čas_uhl_1 [s]	Čas_uhl_2 [s]		
23493,964	23494,241	23494,092	23494,389	0,128	28,125

Na ulici Hlubočická, kde meranie prebiehalo, je maximálna povolená rýchlosť 50 km/h. Touto rýchlosťou sa však vozidlá pohybovať môcť nebudú. Ulica je celkom úzka a kvôli vyháňaniu sa protiúdcim vozidlám, vozidlám, ktoré stoja na krajnici vozovky a nepriehľadným zákrutám, rýchlosť prejazdu nebude vysoká. Ďalej z takto usporiadaných grafov je možné určiť, ktorým smerom sa vozidla pohybujú. Či sa vozidla pohybujú smerom nahor alebo nadol po ulici. To určím na základe času zaznamenaného peaku. Pokiaľ je čas senzoru z uhlíkovej trubičky menší ako v prípade PDMS senzorov, pohybovalo sa vozidlo smerom nadol. Pokiaľ by sa časy obrátili vozidlo sa pohybuje za naopak nahor po ulici.

## 9.1 Návrh algoritmu na výpočet rýchlosti v SW Matlab

Keďže meranie rýchlosti prebiehalo počas niekoľkých hodín, bolo potrebné zostaviť zdrojový kód v SW Matlab, ktorý pri načítaní upravených dát vypočíta rýchlosť automaticky a nebude potrebné počítať rýchlosť ručne pre každý prejazd. Vývojový diagram zdrojového kódu je zobrazený na obrázku 9.2.



Obrázok 9.2: Vývojový diagram programu na výpočet rýchlosti vozidiel

V prvej časti programu sa nastaví premenné „i“ a „j“ na hodnotu 1, aby som mohol následne prechádzať dĺžku polí z časov, ktoré zaznamenala funkcia findpeak už zo spracovaných dát merania. Tieto časy pochádzajú zo senzorov PDMS a zo senzoru z uhlíkovej trubičky alebo taktiež je možné použiť časy z optických brán. Dostávam sa k prvej podmienke v cykle, ktorá kontroluje či už sa program dostal na koniec poľa.

Pokiaľ je podmienka splnená prejde program na koniec a cyklus sa ukončí, pokiaľ nie, vypočíta čas medzi senzorom z uhlíkovej trubičky a PDMS senzorom a uloží do premennej „delta\_t“. Rovnakým spôsobom sa postupuje aj v prípade optických brán.

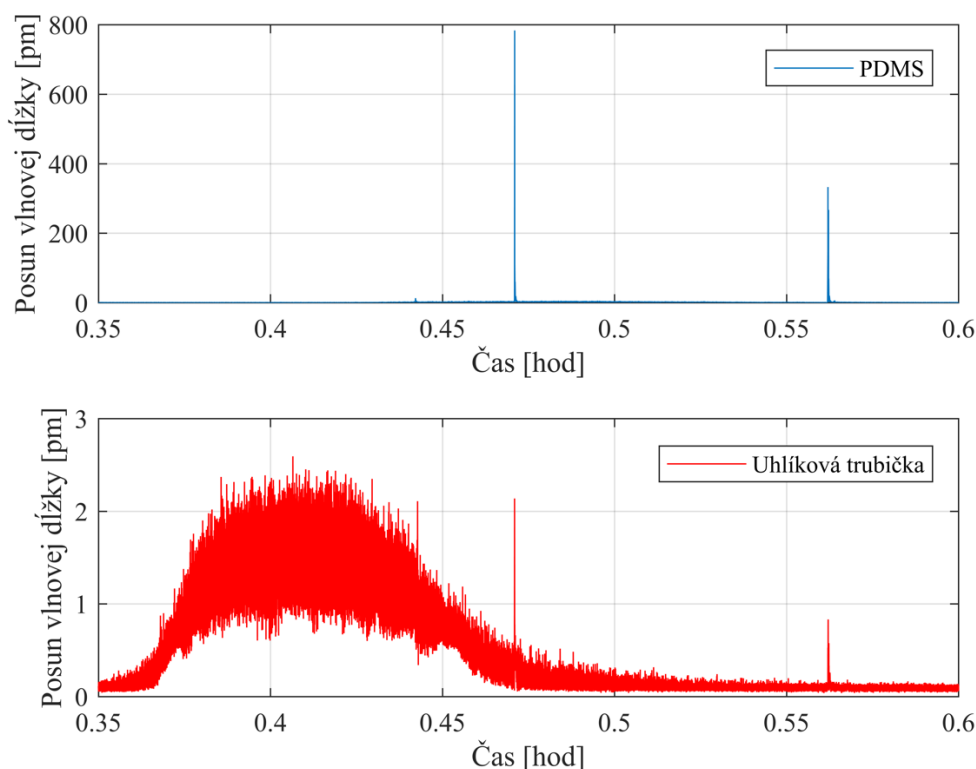
V ďalšej podmienke v cykle sa kontroluje čas. Hodnota, ktorá sa v tejto podmienke kontroluje je minimálny čas, za ktorý prejde vozidlo medzi dvoma senzormi. Z dôvodu, že vozidlo môže prejsť po senzorech v rôznom poradí, kontroluje sa podmienka pre premennú „i“ samostatne a premennú „j“ samostatne. Pokiaľ by nastavený čas bol vyšší premenná „i“ sa inkrementuje ( $i++$ ). To isté platí aj v druhom prípade pre premennú „j“.

Ak naopak ani jedna z oboch podmienok splnená nie je, program vypočíta rýchlosť podľa vzorca 9.2. Vypočítaná rýchlosť sa uloží do premennej „rychlost“, z ktorej môžeme vykonať následnú analýzu. Následne sa obe premenné inkrementujú a znova sa kontroluje podmienka na začiatku.

## 9.2 Výpočet rýchlosti z FBG senzorov v SW Matlab

Ako už bolo spomínané rýchlosť prechádzajúcich vozidiel bola vypočítaná aj z FBG senzorov, konkrétne z PDMS a zo senzoru z uhlíkovej trubičky. V kapitole 7, pri spracovaní nameraných som zistil ako najvhodnejšie nastaviť parametre filtru typu horná prepust' a taktiež parameter funkcie movmean. Z týchto získaných vedomostí som aplikoval rovnaké parametre aj na analýzu tohto ďalšieho merania.

Pri analýze z FBG senzorov bolo zaznamenaných menej prejazdov ako z optických brán. Dôsledkom bolo už spomínané zastavenie niekoľkých vozidiel priamo na senzorech, čo spôsobilo výrazný šum. Ten je zobrazený na obrázku 9.3. Ďalším ovplyvňujúcim faktorom bolo neustále prechádzanie po vozovke pri nastavovaní laseru z optických brán, kvôli čomu dochádzalo k rozvibrovaniu optického vlákna vo vnútri uhlíkovej trubičky.



Obrázok 9.3: Zobrazenie vysokého šumu z FBG v uhlíkovej trubičke v porovnaní s PDMS senzorom

Ako už bolo opísané v kapitole pre spracovanie dát, tak aj v tomto prípade je možné vidieť, že trubička je náchylná na otrasy. Pri porovnaní prejazdov v oboch grafoch na obrázku 9.3, sú prejazdy dostatočne detekované. Šum, nijako výrazne neovplyvnil detekciu prejazdu. Problém však nastáva pri spustení programu na výpočet rýchlosti a detekciu peakov pomocou funkcie findpeak. Táto funkcia hľadá peaky nielen pre prejazdy vozidiel, ale taktiež peaky spôsobené okolitými rušeniami. Pretože v tomto prípade je posun vlnovej dĺžky väčší ako samotného prejazdu. Vtedy nastáva chyba merania pri výpočte rýchlosti.

Po spustení programu na výpočet rýchlosti bolo pri tomto type senzorov vypočítaných 115 rýchlostí nad 10 km/h. Z tohto počtu došlo opäť k nepresnému výpočtu piatich rýchlostí v rozmedzí od 128,57 do 450 km/h. To bolo spôsobené v dôsledku šumu, ktorý ostal v signáli po úprave filtrom. Ďalšou príčinou bolo občasné prechod ľudí po senzorech.

### 9.3 Výpočet rýchlosti z referenčného merania v SW Matlab

Pri tomto meraní boli vozidlá detekované pomocou optických brán. Po spustení programu na výpočet rýchlosti bolo vypočítaných 136 prejazdov. Nedostatkom tohto merania bolo prerušenie merania vplyvom slnečného žiarenia v kapitole 8, v dôsledku čoho neboli niektoré prejazdy zaznamenané. Zvedavosť niektorých prechádzajúcich ľudí vo vozidlách spôsobila taktiež zníženie počtu vypočítaných prejazdov. Program, je ale aj v tomto prípade nastavený aby počítal s rýchlosťou, ktorá bude vyššia ako 10 km/h. To je ďalšou príčinou, prečo bolo vypočítaných menej prejazdov. Niektorí vodiči len pribrzdili a tak ich rýchlosť bola veľmi nízka. Popríklad niektorí vodiči zastavili v mieste senzoru. V dôsledku občasného nastavovania lúča z laseru laseru (viď obrázok 8.7) došlo k nepresnému meraniu rýchlosti. Algoritmus vyhodnotil aj tieto peaky ako prejazdy vozidiel. Konkrétne boli vypočítané rýchlosti od 72 do 1800 km/h. Počet takýchto prejazdov bol 6.

### 9.4 Úspešnosť detekcie vozidiel zo senzorov

Pri oboch typoch meraní rýchlosti (z optických brán a senzorov z PDMS a uhlíkovej trubičky) boli prejazdy vozidiel zaznamenávané aj ručne z dôvodu zistenia úspešnosti detekcie merania rýchlosti. Po sčítaní prejazdov z ručného zapisovania som zistil, že bolo celkom 140 prejazdov vozidiel. V tabuľke 9.2 je sumarizácia nepresnosti meraní, ku ktorým došlo pri meraní rýchlosti prostredníctvom FBG senzorov (výpočet rýchlosti na základe senzorov z PDMS a uhlíkovej trubičky) a optických brán. Pri FBG senzorech bol výsledný počet oproti o 21,43 % nižší v porovnaní k skutočnému počtu prejazdov a v prípade optických brán to bola hodnota 7,14%. Počet rýchlosti zo senzorov je už po odpočítaní nepresného výpočtu rýchlosti a rýchlosti pod 10 km/h.

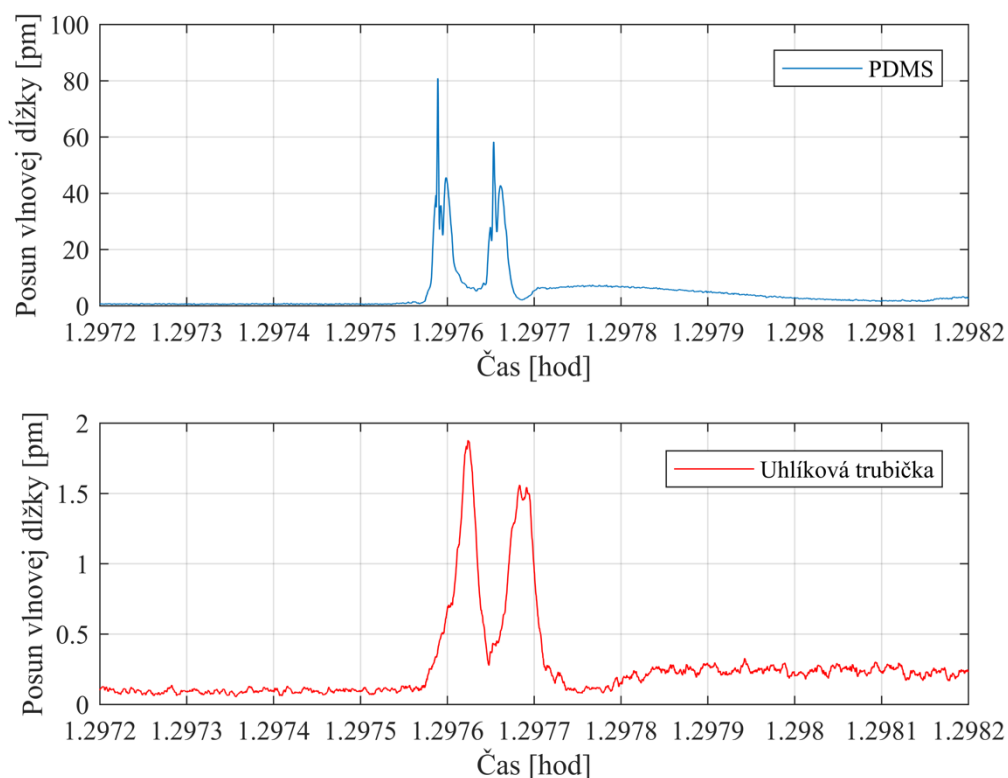
Tabuľka 9.2: Počet prejazdov

	Skutočný počet prejazdov (ručný zápis) [-]	Počet prejazdov vypočítaných cez program na výpočet rýchlosti (po odčítaní nepresného merania)	
		FBG senzory [-]	Optické brány [-]
	140	110	130
<b>Rozdiel voči skutočným prejazdom [%]</b>	-	21,43	7,14

## 9.5 Presnosť merania rýchlosti FBG senzorov

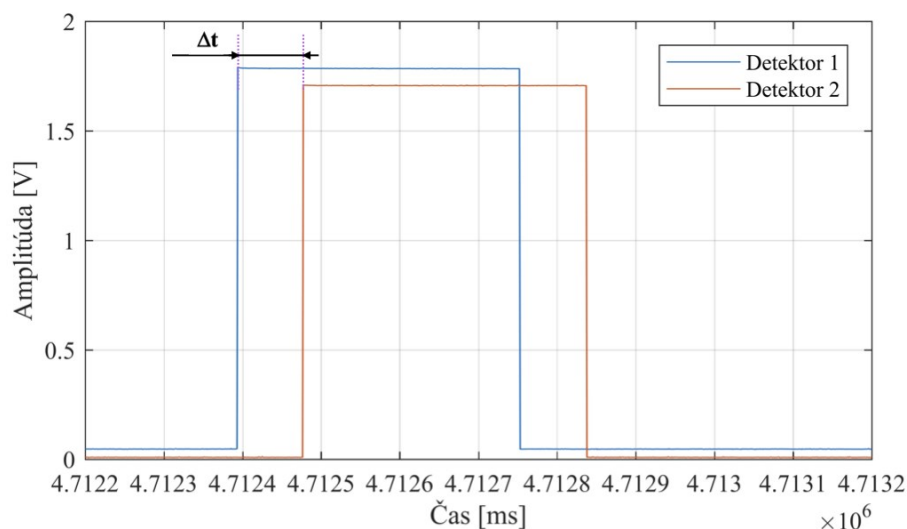
Na základe referenčného merania som mohol vypočítať relatívnu chybu merania rýchlosti z FBG senzorov. Meranie FBG senzorov a optických brán bolo pustené v rovnaký čas, aby bola zabezpečená následne lepšia analýza prechádzajúcich vozidiel.

Na obrázku 9.4 je zobrazený prejazd vozidla cez FBG senzory implementované v asfalte a na obrázku 9.5 je zobrazený rovnaký prejazd vozidla v rovnaký čas, ale cez optické brány.



Obrázok 9.4: Prejazd vozidla cez FBG senzory





Obrázok 9.5: Prejazd vozidla cez optické brány

Relatívnu chybu merania vypočítam podľa vzorca:

$$\delta_r = \left| \frac{X - X_0}{X_0} \right| 100\%; \quad (9.4)$$

kde  $X$  je vypočítaná rýchlosť vozidla z FBG senzorov a  $X_0$  je vypočítaná rýchlosť z optických brán. V tabuľke 9.3 je vypočítaná chyba rýchlosti z jedného prejazdu, ktorý som náhodne vybral a manuálne vypočítal. Z tohto prejazdu som zobral prvý peak z PDMS senzorov a prvý peak z uhlíkovej trubičky, na základe ktorej som vypočítal rýchlosť. Podobne aj tak pre optické brány, kde som zobral čas nábežnej hrany z oboch detektorov. Následne som podľa vzorca 9.4 vypočítal relatívnu chybu tohto jedného prejazdu.

Tabuľka 9.3: Relatívna chyba jedného prejazdu pri manuálnom výpočte rýchlosti

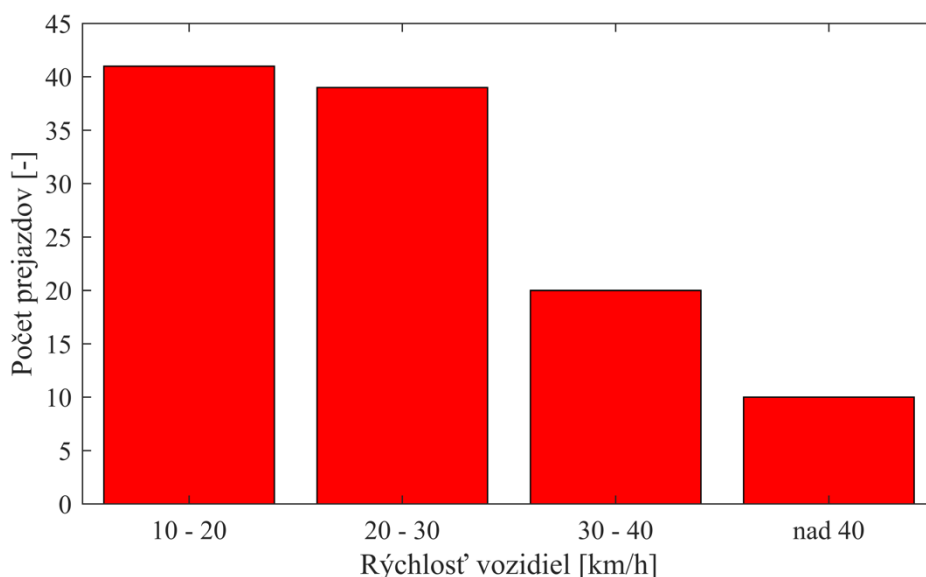
		Relatívna chyba
Rýchlosť z FBG senzorov	23,81 km/h	3,41 %
Rýchlosť z optických brán	24,65 km/h	

Aby som nemusel počítať každý prejazd manuálne, tak ako bolo písané vyššie, upravil som si zdrojový kód v SW Matlab. Ten mi zobrazí vypočítanú rýchlosť pre rovnaký prejazd vozidla z FBG a taktiež optických brán. Z týchto rýchlostí som vybral náhodných 10 vypočítaných rýchlostí rovnakých prejazdov optických brán a FBG senzorov (senzor z uhlíkovej trubičky a PDMS senzorov) na základe, ktorých som určil relatívnu chybu merania (tabuľka 9.4).

Tabuľka 9.4: *Relatívne chyby vypočítaných rýchlostí prostredníctvom SW Matlab*

<b>Rýchlosť z optických brán [km/h]</b>	<b>Rýchlosť z FBG senzorov [km/h]</b>	<b>Relatívna chyba merania [%]</b>
48,65	32,14	33,94
16,36	16,51	0,92
21,69	28,35	30,71
38,71	11,69	69,80
31,86	75,00	135,40
15,72	14,46	8,02
37,11	29,27	21,13
14,75	13,43	8,95
40,45	25,17	37,78
17,06	21,66	44,55
<b>Priemer</b>		39,12

Z tabuľky 9.4 je možné vidieť, že priemer relatívnej chyby zo všetkých 10 prejazdov je na hodnote 39,12 %, čo je pomerne vysoké číslo. V troch prípadoch z desiatich výpočtov je chyba < 10%. K vysokej chybe merania došlo v dôsledku nesprávneho určenia peaku pomocou funkcie findpeak. Pre správny výpočet rýchlosti je potrebné aby táto funkcia označila rovnakú nápravu prechádzaného vozidla. To znamená že označí v grafe z PDMS senzorov a rovnako aj v grafe zo senzora z uhlíkovej trubičky len prednú nápravu alebo naopak len zadnú nápravu. Pokiaľ dôjde k situácii, že v jednom senzore bude pri danom prejazde označená zadná náprava a v druhom predná náprava, dôjde k nesprávnemu výpočtu a tým bude relatívna chyba vysoká. Pokiaľ sa pozrieme na hodnotu relatívnej chyby v tabuľke 9.3, kde vyšla pri ručnom výpočte hodnota 3,41 % je táto chyba v porovnaní s automatickým výpočtom v SW Matlab výrazne nižšia. Túto hodnotu som dostal práve tak, že som vypočítal rýchlosť práve z peaku prvej nápravy prechádzaného vozidla zo senzorov PDMS a uhlíkovej trubičky. Ďalším dôvodom nesprávneho výpočtu je taktiež možnosť, že boli použité rôzne typy senzorov. Z analyzovaných dát sa občas stalo, že zo senzora z uhlíkovej trubičky nedošlo k dôkladnému zaznamenaniu prednej a zadnej nápravy (zobrazenie dvoch peakov), ale bol zaznamenaný len prejazd celkovo (zobrazený len jeden peak). V tomto prípade môže byť čas prejazdu posunutý a tým rýchlosť prechádzaného vozidla skreslená. Súhrn rýchlostí z tohto merania, ktorými sa vozidla po ulici pohybovali je zobrazený na obrázku 9.6.



Obrázok 9.6: Súhrn rýchlosti z merania

## 9.6 Sumarizácia meraní rýchlosti z ostatných dní

Meranie rýchlosti na ulici Hlubočická prebiehalo aj iné dni. Konkrétne išlo o tri dni kedy bolo meranie pustené viac pol dňa. Namerané dáta boli spracované podľa doteraz zistených výsledkov. V tabuľke 9.5 sú zobrazené výsledky meraní z týchto dní. Výsledný počet prejazdov a z nich vytvorená analýza sa vzťahuje na rýchlosti v rozmedzí od 10 do 70 km/h. Rýchlosti > 70 km/h by na tejto ulici pri prejazde autom už pravdepodobne neboli možné. Preto som do úvahy bral len rýchlosti v tomto obmedzení. Maximálna povolená rýchlosť v obci v Českej republike je obmedzená na 50 km/h. Na ulici, kde meranie prebiehalo nie je pod iný limit obmedzenia maximálnej rýchlosti, preto aj tu platí maximálna rýchlosť 50 km/h. V poslednom stĺpci tabuľky 11.2 je vidieť percentuálnu hodnotu prekročenia maximálnej povolenej rýchlosti.

Tabuľka 9.5: Sumarizácia z prevádzaných meraní rýchlosti vozidiel

Merací deň [-]	Počet prejazdov [-]	Priemerná rýchlosť [km/h]	Počet prejazdov, ktoré prekročili povolenú rýchlosť (> 50 km/h) [%]
1	151	27,08	14
2	100	24,72	3
3	108	27,55	10

Podľa zistení chyby merania rýchlosti môže byť aj v tomto prípade rozdielny počet vypočítanej rýchlosti od skutočnej rýchlosti prechádzaných vozidiel.

## Záver

Meranie rýchlosti automobilov predstavuje v dnešnej dobe dôležitú úlohu. V českej republike začalo platiť obmedzenie rýchlosti od roku 1900 pre obce a od roku 1905 už aj mimo obce. Na cesty neustále pribúda viac a viac vozidiel a to s rôzne vysokým výkonom. Tieto vozidlá nemajú problém prekonať maximálnu povolenú rýchlosť. Taktiež závisí od vodiča, ktorý vozidlo šoféruje, či rýchlosť prekročí. V dôsledku bezpečnosti na cestách sa vyvíjajú rôzne metódy na meranie rýchlosti automobilov. Najčastejšie merania, ktoré sa v súčasnosti využívajú sú meranie rýchlosti pomocou laseru, úsekové meranie rýchlosti alebo bodové meranie rýchlosti.

V súčasnosti sa v každom väčšom meste nachádza optická sieť. Tá je však využívaná na komunikačné účely medzi účastníkmi.

Čoraz častejšie je možné sa stretnúť s pojmom optické senzory. Pomocou týchto senzorov je možné merať rôzne fyzikálne vlastnosti ako napríklad tlak, teplotu, vibrácie a taktiež po správnom navrhnutí aj rýchlosť vozidiel. Práve meraniu rýchlosti na základe optovláknových Braggovských mriežok sa venuje táto diplomová práca.

Cieľom tejto práce bolo na základe teoretických poznatkov a už navrhnutých konceptov navrhnuť a zrealizovať senzor využívajúci Braggovské mriežky na detekciu merania rýchlosti automobilov. Posledným bodom cieľa práce bolo praktické overenie funkčnosti senzora v reálnej premávke.

Braggovská mriežka tvorí základ pri návrhu takéhoto typu senzora. Kapitola 5.3 opisuje koncept pre meranie rýchlosti a váženie vozidiel z optických senzorov implementovaných do vozovky. Kapitola 5.10 zobrazuje podrobný opis správania sa Braggovskej mriežky po implementácii do asfaltovej vzorky. Tieto koncepty boli kľúčové pri návrhu môjho senzora. V práci som na zalievanie optického vlákna spolu s Braggovskou mriežkou využíval materiál PDMS. Práve tento materiál preukázal vhodné vlastnosti pri prejazde vozidla. Na základe analýzy som navrhol a vytvoril senzorový pás z FBG, tak aby bolo vozidlo pri prejazde cez ulicu detekované.

Po spracovaní dát z tohto senzora som zistil, že senzor nedokázal dostatočne zaznamenať prejazd vozidla vo vzdialenosti nad 30 cm od. Na základe týchto vzdialeností bol realizovaný návrh retiazky z PDMS senzorov s FBG, ktoré boli od seba v rozmedzí 60 cm. Pokiaľ vozidlo prejde kolesom presne medzi senzormi je táto vzdialenosť dostatočná na vyvolanie odozvy aspoň jedného senzoru. Na základe zistených údajov som do vozovky implementoval pás s piatimi PDMS senzormi. Po vytvorení vznikol retiazok z jednotlivých PDMS senzorov s dĺžkou 320 cm. Pri návrhu tohto retiazku som ďalej potreboval určiť vlnové dĺžky jednotlivých senzorov z dôvodu neprekrývania sa vlnových dĺžok senzorov. Pri určovaní vlnových dĺžok som bral do úvahy posun vlnovej dĺžky v dôsledku tuhnutia materiálu PDMS, zmeny teploty vozovky, posun vlnovej dĺžky v dôsledku deformácie pri prejazde vozidla. Po výpočte bol rozdiel medzi vlnovými dĺžkami 6,1 nm. Z dôvodu obmedzenia dostupných FBG nebol rozdiel medzi použitými vlnovými dĺžkami senzorov vždy 6,1 nm. V jednom prípade bol rozdiel medzi vlnovými dĺžkami 5,9 nm. V ostatných prípadoch bol rozdiel vyšší ako 6,1 nm. Konkrétne vlnové dĺžky, ktoré som použil boli: 1529,843 nm; 1540,031 nm; 1547,613 nm; 1554,371 nm a 1560,399 nm.

Na výpočet rýchlosti na základe optických senzorov je potrebné poznať dva časy prechádzaného vozidla. To som docielil vyhotovením a implementovaním ďalšieho senzora, do vozovky vo vzdialenosti 1 m od PDMS senzorov. Tento senzor bol vytvorený pomocou uhlíkovej trubičky, do ktorej som vsunul optické vlákno s FBG. Trubička mala dĺžku 320 cm, rovnako ako retiazok s PDMS senzormi. Pri tomto senzore som použil FBG, ktorej vlnová dĺžka bola 1510,044 nm. Po zalepení vlákna s uhlíkovou trubičkou bola hodnota vlnovej dĺžky FBG 1510,5 nm. Na základe vzdialenosti medzi oboma senzormi a rozdielom časov  $\Delta t$ , prvej nápravy z oboch senzorov je možné vypočítať rýchlosť prechádzaného vozidla.

Po spracovaní dát zo senzorov som zistil, že pri prejazde senzora z uhlíkovej trubičky dochádza výrazne menšej zmene vlnovej dĺžky ako v prípade PDMS senzorov. U trubičky som zaznamenal posun vlnovej dĺžky od 0,5 do 4,5 pm. Po sčítaní jednotlivých PDMS senzorov dochádza k posunu vlnovej dĺžky od 20 do 900 pm. Konkrétne na obrázku 9.4 je možné vidieť porovnanie prejazdu vozidla cez senzory, kde pri prejazde prvej nápravy došlo k posunu vlnovej dĺžky u PDMS senzorov o 80,84 pm a v prípade senzoru z uhlíkovej trubičky 1,89 pm. Aj takáto zmena vlnovej dĺžky dosť na detekciu vozidla a následne pre výpočet rýchlosti prejazdu. V trubičke dochádza k vibráciám vlákna vo vnútri trubičky. Niekedy to však predstavovalo nedostatočné zobrazenie oboch náprav od vozidla a v prípade väčších vibrácií vlákna nemusí byť prejazd vozidla detekovaný.

Z výpočtu rýchlosti podľa rovnice 9.2, bola rýchlosť spomínaného prejazdu 23,81 km/h. Pre automatický výpočet bol v SW Matlab spracovaný zdrojový kód, ktorý bude počítať rýchlosť po spracovaní dát zo všetkých prejazdov. Aby bolo možné vidieť presnosť merania rýchlosti optických senzorov, boli použité na meranie rýchlosti aj optické brány. Tie boli umiestnené v rovnakej vzdialenosti ako FBG senzory. Po spracovaní dát z merania optických senzorov a optických brán bolo náhodne vybraných 10 prejazdov, z ktorých bola zistená chyba merania pri výpočte rýchlosti z optických senzorov. Došlo k chybe merania 39,12 % v prípade, že sa rýchlosť počítala automaticky prostredníctvom navrhnutého zdrojového kódu. Pri ručnom výpočte spomínaného prejazdu, ktorého rýchlosť bola 23,81 km/h došlo k chybe 3,41 %.

Po preskúmaní prečo je chyba merania tak vysoká, bolo zistené, že senzor z uhlíkovej trubičky nedokáže v niektorých prejazdoch detekovať obe nápravy a je zobrazená len jedna. Príčinou taktiež je, že vlákno sa pri prejazde prvou nápravou rozvibruje a nedokáže detekovať druhú nápravu alebo je už rozvibrované pred prejazdom auta v dôsledku chvenia sa vozovky, po ktorej sa vozidlo pohybuje. Ďalším dôvodom nepresného merania je konkrétny výpočet v SW Matlab. Rýchlosť sa vypočítava na základe času detekovanej nápravy prostredníctvom funkcie findpeak v Matlabe. Čas nájdeného peaku v grafe z detekovanej nápravy vozidla sa zapíše do matice. Pri správnom výpočte funkcia označí z oboch senzorov vždy rovnakú nápravu vozidla pri prejazde po senzoroch. Chyba výpočtu nastane vtedy, keď funkcia findpeak z daného prejazdu označí v jednom senzore prednú nápravu a v druhom senzore zadnú nápravu. Vtedy je čas prejazdu skreslený a rýchlosť merania nepresná.

Riešením tohto problému by bolo používať rovnaké typy senzorov na meranie rýchlosti, z čoho by sa dalo predpokladať, že grafy by boli približne rovnaké a funkcia findpeak by označila vždy rovnako nápravu pri prejazde. Ďalším riešením je upraviť zdrojový kód na výpočet rýchlosti, tak aby bral do úvahy na výpočet rýchlosti len prvý peak (prvú nápravu prejazdu) a to z oboch senzorov a druhý peak (nápravu) nebral do úvahy. To znamená že pre každý prejazd by bolo vytvorené okno v časovej šírke,

v ktorom by sa nachádzal len jeden prejazd, z ktorého by bol zapísaný čas len prvej nápravy. Tento postup by platil pre oba implementované senzory.

Myslím si, že do budúcnosti by mohlo byť veľkým prínosom realizácia takéhoto typu merania v automobilovej doprave. Senzory majú len veľmi malé rozmery, čo je výhodou pri meraní rýchlosti, z dôvodu, že vodiči by o takomto meraní nevedeli a teda by nemohli spomaliť pred meraním. Ďalšou výhodou optovláknových senzorov je odolnosť voči vlhkosti, poveternostným podmienkam, elektrickému a magnetickému rušeniu.

## Použitá literatúra

- [1] KASHYAP, Raman. *Fiber Bragg gratings*. 2nd ed. Burlington, MA: Academic Press, c2010. ISBN 978-0-12-372579-0.
- [2] SENIOR, John M. a M. Yousif JAMRO. *Optical fiber communications: principles and practice*. 3rd ed. New York: Financial Times/Prentice Hall, 2009. ISBN 978-0-13-032681-2.
- [3] M. Nishimura, *Optical fibers and fiber dispersion compensators for high-speed optical communication*, J. Opt. Fiber Commun. Rep., 2, n. 115–139, 2005.
- [4] G. Mahlke and P. Gossing, *Fiber Optic Cables (4th ed)*, Publicis MCD Corporate Publishing, 2001.
- [5] KASHYAP, Raman. *Fiber Bragg gratings*. 2nd ed. Burlington, MA: Academic Press, c2010. ISBN 978-0-12-372579-0.
- [6] AGRAWAL, G. P. *Fiber-optic communication systems*. 3rd ed. New York: Wiley-Interscience, c2002. ISBN 0-471-21571-6.
- [7] FERDINAND, Pierre, Sylvain MAGNE, Véronique DEWYNTER-MARTY, Stéphane ROUGEAULT a Laurent MAURIN. *Applications of Fiber Bragg Grating Sensors in the Composite Industry*. MRS Bulletin [online]. 2002, 27(05), 400-407 [cit. 2018-10-03]. DOI: 10.1557/mrs2002.126. ISSN 0883-7694. Dostupné z: [http://www.journals.cambridge.org/abstract\\_S0883769400021023](http://www.journals.cambridge.org/abstract_S0883769400021023)
- [8] Antiradary.sk – Najväčší predajca antiradarov na Slovensku | Čo je to Dopplerov jav a ako sa dá pužiť na meranie. Antiradary.sk – Najväčší predajca antiradarov na Slovensku [online]. Copyright © 2014 [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: <http://www.antiradary.sk/informacie-o-antiradaroch/dopplarov-jav>
- [9] JIENI ZHANG a Xuesong MAO. Optimal bandwidth design of laser radar receiver. In: 2015 14th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON) [online]. IEEE, 2015, 2015, s. 1-3 [cit. 2019-04-08]. DOI: 10.1109/ICOON.2015.7203717. ISBN 978-1-4673-7373-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7203717/>
- [10] Yilmaz Kalkan. *Frequency-Only Radars and Other Frequency-Based Systems with Applications*. Microwave Magazine IEEE, vol. 17, pp. 26-52, 2016, ISSN 1527-3342.q
- [11] Whitten L. SCHULZ, John M. SEIM, Eric UDD, Mike MORRELL, Harold M. LAYOR, Galen E. MCGILL, Robert EDGAR, *Traffic monitoring/control and road condition monitoring using fiber optic-based systems* [online]. In: 1999-5-18 [cit. 2018-05-04]. DOI: 10.1117/12.348660 Dostupné z: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/3671/0000/Traffic-monitoring-control-and-road-condition-monitoring-using-fiber-optic/10.1117/12.348660.short>
- [12] KUNZLER, Marley, Eric H. ANDERSON, Eric UDD, Tad TAYLOR a Wesley KUNZLER. *Second-generation fiber grating traffic monitoring systems on the I-84 freeway* [online]. In: . 2003-8-12, s. 230- [cit. 2018-05-04]. DOI: 10.1117/12.483693. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.483693>

- [13] Marley Kunzler, Robert Edgar, Eric Udd, Tad Taylor, Whitten L. Schulz, Wesley Kunzler, Steven M. Soltesz, *Fiber grating traffic monitoring systems*, Proc. SPIE 4696, Smart Structures and Materials 2002: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways, 28. June 2002.
- [14] UDD, Eric, A. G. MIGNANI a H. C. LEFÈVRE. Monitoring trucks, cars and joggers on the horsetail falls bridge using fiber optic grating strain sensors. In: *Fourteenth International Conference on Optical Fiber Sensors* [online]. SPIE, 2000, 2000-11-9, s. 15- [cit. 2018-05-04]. DOI: 10.1117/12.2302159. ISBN 9780819438485. Dostupné z: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/4185/2302159/Monitoring-trucks-cars-and-joggers-on-the-horsetail-falls-bridge/10.1117/12.2302159.full>
- [15] John M. SEIM, Eric UDD, Whitten L. SCHULZ, Robert MACMAHON, Steven M. SOLTESZ, Harold M. LAYLOR, Development and deployment of fiber optic highway and bridge monitoring sensor systems. In: *Nondestructive Evaluation of Highways, Utilities, and Pipelines IV* [online]. 2000-06-09; [cit. 2018-04-08]. DOI: 10.1117/12.387840 Dostupné z: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/3995/0000/Development-and-deployment-of-fiber-optic-highway-and-bridge-monitoring/10.1117/12.387840.short>
- [16] MELLER, Scott A., Marten J. DE VRIES, Vivek ARYA, Kent A. MURPHY, Richard O. CLAUS, Alan C. CHACHICH a Marten J. DE VRIES. [online]. In: . 1995-12-27, s. 39-45 [cit. 2018-05-10]. DOI: 10.1117/12.228919. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=1009215>
- [17] Ramesh B. Malla, Amlan Sen, Norman W. Garrick „A Special Fiber Optic Sensor for Measuring Wheel Loads of Vehicles on Highways“, Department of Civil & Environmental Engineering, University of Connecticut, Storrs, Connecticut 06269-2037, U.S.A, i2 Technologies, Inc., Dallas, TX, U.S.A. (Formerly, Department of Civil & Environmental Engineering, University of Connecticut, Storrs, CT, U.S.A (11.4.2008)
- [18] AL-TARAWNEH, Mu'ath, Ying HUANG a Hoon SOHN. In-pavement fiber Bragg grating sensor for vehicle speed and wheelbase estimation. In: *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2018* [online]. SPIE, 2018, 2018-3-27, s. 84- [cit. 2018-04-08]. DOI: 10.1117/12.2295624. ISBN 9781510616929. Dostupné z: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10598/2295624/In-pavement-fiber-Bragg-grating-sensor-for-vehicle-speed-and/10.1117/12.2295624.full>
- [19] Cosentino, Paul & Eckroth, Wulf & Grossman, Barry. (2003). *Analysis of Fiber Optic Traffic Sensors in Flexible Pavements*. Journal of Transportation Engineering-asce - J TRANSP ENG-ASCE. 129. 10.1061/(ASCE)0733-947X(2003)129:5(549)
- [20] Garcia OTTO, Gustavo & Michel Simonin, Jean & Piau, Jean & Marie Cottineau, Louis & Chupin, Olivier & MOMM, Leto & Mattar VALENTE, Amir. (2017). *Weigh-in-motion (WIM) sensor response model using pavement stress and deflection*. Construction and Building Materials. 156. 83-90. 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.085.
- [21] Kara De Maeijer, Patricia & Van den bergh, Wim & Vuye, Cedric. (2018). *Fiber Bragg Grating Sensors in Three Asphalt Pavement Layers*. Infrastructures, Special Issue Sustainable Transportation Infrastructures. 3. 1-16. 10.3390



- [22] Vysokorychlostní dynamické vážení za jízdy | OptiWIM. Vysokorychlostní dynamické vážení za jízdy | OptiWIM [online]. Copyright © [cit. 08.04.2018]. Dostupné z: <http://www.optiwim.cz>
- [23] STANIMIROVIĆ, Ivanka a Zdravko STANIMIROVIĆ, ed. *Temperature Sensing* [online]. InTech, 2018 [cit. 2019-04-10]. DOI: 10.5772/intechopen.71461. ISBN 978-1-78923-502-9.
- [24] FAJKUS, Marcel. *Modelování optovláknových senzorů s Braggovskými mřížkami*. Ostrava, 2017. Dizertační práce. VŠB–TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. Vedoucí práce Prof. RNDr. VLADIMÍR VAŠINEK, CSc